

TUGAS AKHIR

ANALISIS EFISIENSI OPERASIONAL SISTEM PLTGU UNIT GTG 2.3 DI PT INDONESIA POWER SEMARANG *POWER GENERATION UNIT*



Disusun dalam Memenuhi
Syarat Guna Memperoleh Gelar Sarjana Teknik (S1)
Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik
Universitas Semarang

USM
INDRA YOGASWARA
C.441.18.0032

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SEMARANG
SEMARANG
2020**

**HALAMAN PENGESAHAN
TUGAS AKHIR DENGAN JUDUL**

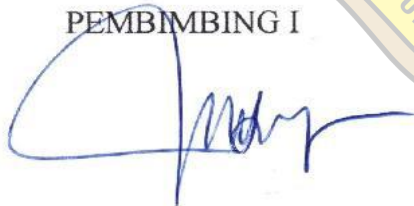
**ANALISIS EFISIENSI OPERASIONAL SISTEM PLTGU UNIT GTG 2.3
DI PT INDONESIA POWER SEMARANG *POWER GENERATION UNIT***

**NAMA : INDRA YOGASWARA
NIM : C.441.18.0032**

Disusun dalam Memenuhi
Syarat guna Memperoleh Gelar Sarjana Teknik (S1)
Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik
Universitas Semarang

**TELAH DIPERIKSA DAN DISETUJUI
SEMARANG, 7 AGUSTUS 2020.....**

PEMBIMBING I



Dr. Supari, ST, MT
NIS.06557003102033

PEMBIMBING II



Harmini, ST, M.Eng
NIS.06557003102136

USM

KETUA JURUSAN TEKNIK ELEKTRO



Titik Nurhayati, ST, M.Eng
NIS.06557003102025



BERITA ACARA UJIAN TUGAS AKHIR

Pada hari ini Senin, tanggal 27 Juli 2020 bertempat di Fakultas Teknik, telah dilaksanakan Ujian TA Mahasiswa Program Studi S1 Teknik Elektro Universitas Semarang Periode semester Genap Tahun Akademik 2019/2020.

Nama Mahasiswa : INDRA YOGASWARA
NIM : C.441.18.0032
Fakultas : Teknik
Program Studi : S1 Teknik Elektro
Judul TA : ANALISIS EFISIENSI OPERASIONAL SISTEM PLTGU UNIT GTG 2.3 DI PT. INDONESIA POWER SEMARANG POWER GENERATION UNIT
Judul KP : Identifikasi autotransfer failure antara UAT dan SST pada PDC GTG 2.2 PLTGU Blok 2 PT. Indonesia Power Semarang PGU

Dengan Hasil :

NO	NAMA PENGUJI	JABATAN	NILAI	TANDA TANGAN
1	Dr. Supari, ST, MT	Ketua Penguji	80	
2	Harmini, ST, M.Eng	Anggota Penguji	80	
3	Titik Nurhayati, ST, M.Eng	Anggota Penguji	80	
Total Nilai			240	

Nilai Angka

: $240/3 = 80$

Nilai Huruf

: A **USM**

Keterangan

: Lulus / Tidak Lulus

Mengetahui,
Wakil Dekan

Ir. Bambang Tutuko, M.M, M.T.
NIS. 06557003102013

Semarang, 27 Juli 2020
Ka. Prodi S1 Teknik Elektro

Titik Nurhayati, S.T., M.Eng.
NIS. 06557003102025

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Tugas Akhir ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Indra Yogaswara

NIM : C.441.18.0032

Tanda Tangan : 

Tanggal : 7 Agustus 2020



USM

Yang menyatakan,



(Indra Yogaswara)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN TUGAS AKHIR.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL.....	x
ABSTRAK.....	xi
<i>ABSTRACT</i>	xii
KATA PENGANTAR.....	xiii
BAB I	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Metodologi Penelitian.....	4
1.7 Sistematika Penulisan.....	5
BAB II.....	7
2.1 Tinjauan Pustaka.....	7
2.2 PLTGU (Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap).....	9
2.3 Komponen Pada GTG.....	13
2.3.1 Komponen Utama.....	15

2.3.1.1	Kompresor	15
2.3.1.2	Ruang Bakar (<i>Combustion Chamber</i>)	17
2.3.1.3	Turbin Gas	20
2.3.2	Komponen Pendukung	23
2.3.2.1	Sistem Permulaan	23
2.3.2.2	Sistem Pembakaran	24
2.3.2.3	Sistem Pelumasan	24
2.3.2.4	Sistem Pendingin	25
2.4	Siklus <i>Brayton</i>	25
2.5	Entalpi	27
BAB III	30
3.1	Tempat Penelitian	30
3.2	Alat dan Bahan	31
3.2.1	Alat Pengujian	31
3.2.2	Bahan Pengujian	31
3.3	Sistematika Penulisan	32
3.4	Sistematika Pengolahan Data	35
3.5	Data Spesifikasi Unit GTG 2.3	37
3.6	Data Operasi Unit GTG 2.3	38
BAB IV	40
4.1	Nilai Rata-Rata Data Operasi Unit GTG 2.3	40
4.1.1	Daya Output	40
4.1.2	<i>Temperature</i> Masuk Kompresor	41
4.1.3	<i>Temperature</i> Keluar Kompresor	42
4.1.4	Tekanan Keluar Kompresor	43

4.1.5	<i>Temperature</i> Keluar Turbin.....	44
4.1.6	Laju Aliran Bahan Bakar.....	45
4.2	Perhitungan Nilai Efisiensi	46
4.2.1	Kondisi 1	46
4.2.2	Kondisi 2	47
4.2.3	Kondisi 3	49
4.2.4	Kondisi 4	51
4.2.5	Kalor Masuk	55
4.2.6	Laju Aliran Udara.....	55
4.2.7	Kerja Kompresor.....	55
4.2.8	Kerja Turbin.....	56
4.2.9	Efisiensi Sistem.....	57
4.3	Efisiensi Kompresor.....	58
4.4	Efisiensi Turbin.....	59
4.5	Efisiensi Sistem GTG.....	61
4.6	Analisis Hasil Nilai Efisiensi.....	63
BAB V.....		66
5.1	Kesimpulan.....	66
5.2	Saran.....	67
DAFTAR PUSTAKA.....		68
LAMPIRAN.....		70
BIODATA PENULIS.....		86

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Blok Diagram Proses Menghasilkan Energi Listrik Pada GTG.....	10
Gambar 2.2 Siklus PLTGU (Sumber : PT. Indonesia Power)	11
Gambar 2.3 Komponen Utama Pada GTG	13
Gambar 2.4 Skema Sistem Turbin Gas Sederhana	14
Gambar 2.5 Kompresor Unit GTG 2.3.....	15
Gambar 2.6 Kompresor <i>Axial</i>	16
Gambar 2.7 <i>Spark Plug</i>	18
Gambar 2.8 Ruang Bakar Pada Unit GTG 2.3.....	19
Gambar 2.9 Turbin Gas Keseluruhan.....	20
Gambar 2.10 Turbin Gas Tampak Luar Unit GTG 2.3.....	22
Gambar 2.11 Motor <i>Cranking</i>	24
Gambar 2.12 Skema Siklus <i>Brayton</i>	25
Gambar 2.13 Diagram P-v dan T-s Siklus <i>Brayton</i>	26
Gambar 3.1 Lokasi PT. Indonesia Power Semarang PGU.....	30
Gambar 3.2 Proses Pembakaran Pada Unit GTG.....	32
Gambar 3.3 Diagram Alir Proses Pengerjaan Tugas Akhir	33
Gambar 3.4 Diagram Alir (<i>Flowchart</i>) Proses Pengolahan Data	36
Gambar 3.5 Unit GTG 2.3 Keseluruhan	37
Gambar 4.1 Grafik Daya <i>Output</i> Unit GTG 2.3.....	40
Gambar 4.2 Grafik <i>Temperature</i> Masuk Kompresor Unit GTG 2.3.....	41
Gambar 4.3 Grafik <i>Temperature</i> Keluar Kompresor Unit GTG 2.3.....	42

Gambar 4.4 Grafik Tekanan Keluar Kompresor Unit GTG 2.3	43
Gambar 4.5 Grafik <i>Temperature</i> Keluar Turbin Unit GTG 2.3.....	44
Gambar 4.6 Grafik Laju Aliran Bahan Bakar	45
Gambar 4.7 Grafik Nilai Efisiensi Kompresor	58
Gambar 4.8 Grafik Nilai Efisiensi Turbin.....	60
Gambar 4.9 Grafik Nilai Efisiensi Sistem GTG 2.3	61



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tabel Gas Ideal (1).....	28
Tabel 2.2 Tabel Gas Ideal (2).....	29
Tabel 3.1 Spesifikasi Performansi Unit GTG 2.3	37
Tabel 3.2 Spesifikasi Gas Turbin Unit GTG 2.3.....	38
Tabel 3.3 Data Operasi Unit GTG 2.3 Tanggal 2 Februari 2020.....	39
Tabel 4.1 Hasil Perhitungan Kondisi 1 Sampai Kondisi 2	53
Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Kondisi 3 Sampai Kondisi 4	54
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Nilai Efisiensi Kompresor, Turbin, dan Sistem Unit GTG 2.3	57
Tabel 4.4 Perbandingan Nilai Efisiensi Kompresor Dengan Nilai T_2 dan Nilai P_2	59
Tabel 4.5 Perbandingan Nilai Efisiensi Turbin Dengan Nilai P_3 dan Nilai T_4	60
Tabel 4.6 Perbandingan Nilai Efisiensi Sistem GTG 2.3 Dengan Nilai T_4	62

USM

ABSTRAK

Nama : Indra Yogaswara

NIM : C.441.18.0032

Judul : Analisis Efisiensi Operasional Sistem PLTGU Unit GTG 2.3 Di PT
Indonesia Power Semarang *Power Generation Unit*

Melihat kebutuhan pemakaian energi listrik di Indonesia yang semakin meningkat, maka dibutuhkan sistem pembangkitan tenaga listrik dengan efisiensi operasional yang maksimal, maksudnya adalah suatu pembangkit listrik yang hasil dari pengoperasiannya menghasilkan energi listrik yang efisien dan didasarkan pada aturan dan *standard* yang ada. Besarnya kapasitas energi listrik yang dihasilkan oleh pembangkit listrik dapat dipengaruhi oleh besarnya nilai efisiensi yang berasal dari komponen peralatan yang ada pada pembangkit tersebut seperti kompresor, turbin, dan sistem pada unit GTG (*Gas Turbine Generator*) 2.3 PT. Indonesia Power Semarang *Power Generation Unit*. Efisiensi pada PLTGU unit GTG 2.3 mengalami penurunan akibat beberapa faktor seperti usia yang sudah lama beroperasi, terjadinya gangguan, *derating* (penurunan nilai beban), kesalahan manuver pengoperasian peralatan, proses pemeliharaan yang kurang maksimal, serta faktor-faktor lain. Oleh karena itu perlu dilakukan analisa terhadap efisiensi sistem operasional pada GTG 2.3 apakah unit tersebut masih dalam batasan kondisi layak beroperasi atau tidak. Berdasarkan Boyce tahun 2001 disebutkan idealnya nilai efisiensi sistem pada unit GTG berkisar antara 30%-46% dengan kapasitas beban yang dihasilkan unit GTG tersebut sebesar 3 MW sampai dengan 480 MW.

Setelah dilakukan perhitungan, dapat disimpulkan hasil nilai efisiensi tertinggi, terendah, dan rata-rata pada kompresor, turbin, dan sistem pada unit GTG 2.3 di PT. Indonesia Power Semarang *Power Generation Unit*. Nilai efisiensi tertinggi pada kompresor, turbin, dan sistem pada unit GTG 2.3 secara berturut-turut sebesar 83.40%, 93.68%, dan 37.57%. Nilai efisiensi terendah secara berturut-turut sebesar 79.98%, 90.46%, dan 29.15%. Sedangkan nilai efisiensi rata-rata secara berturut-turut sebesar 81.73%, 91.23%, dan 32.85%. Untuk menjaga nilai efisiensi dari operasional sistem dapat meningkat maka diberikan solusi dengan menyeimbangkan penggunaan antara bahan bakar dan udara yang masuk.

Kata kunci : efisiensi, PLTGU, GTG 2.3

ABSTRACT

Seeing the need of electricity consumption in Indonesia is increasing, it is required that power generation system with maximum operational efficiency, meaning is a power plant that results from its operation produces electrical energy efficiently and is based on the rules and standards that exist. The amount of electrical energy capacity generated by power plant can be influenced by the magnitude of the efficiency value derived from the equipment components in the plant such as compressor, turbine, and system in the GTG (Gas Turbine Generator) Unit 2.3 PT. Indonesia Power Semarang Power Generation Unit. Efficiencies in PLTGU unit GTG 2.3 decreased due to several factors such as long-running age, disruption, derating (decreased load value), maneuvering operation of equipment operations, less maximum maintenance process, and other factors. Therefore, it is necessary to analyze the efficiency of the operational system in GTG 2.3 whether the unit is still under the limits of operating or unviable conditions. Based on Boyce in 2001 it is stated ideally the value of system efficiency in GTG units ranges from 30%-46% with the load capacity generated by the GTG unit amounting to 3 MW up to 480 MW.

After the calculation, it can be concluded the result of the highest, lowest, and average efficiency of the compressor, turbine, and system in unit GTG 2.3 at PT. Indonesia Power Semarang Power Generation Unit. The highest efficiency values on compressors, turbines and systems in GTG 2.3 units respectively amounted to 83.40%, 93.68%, and 37.57%. The lowest efficiency value is consecutively at 79.98%, 90.46%, and 29.15%. While the average efficiency value in succession amounted to 81.73%, 91.23%, and 32.85%. To maintain the value of efficiency of the system's operations can increase, it is given solutions by balancing the use between fuel and incoming air.

Keywords : *efficiency, PLTGU, GTG 2.3*

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan segala puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia dan hidayah-Nya, penulis diberi kekuatan untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini. Sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan Tugas Akhir. Penulisan Tugas Akhir ini dimaksudkan guna memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan Jenjang Pendidikan Sarjana (S-1) Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Semarang.

Dengan telah selesainya Laporan Tugas Akhir ini yang tidak terlepas dari dukungan dan bantuan dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu perkenankanlah penulis menyampaikan ucapan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Andy Kridasusila, SE, MM, selaku Rektor Universitas Semarang.
2. Bapak Purwanto, ST, MT, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Semarang.
3. Ibu Titik Nurhayati, ST, M.Eng, selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Semarang.
4. Bapak Dr.Supari ,ST, MT, selaku Dosen Pembimbing I yang telah bersedia meluangkan waktunya untuk memberikan pengarahan, saran, dan bimbingan materi serta berbagai kemudahan yang memungkinkan dalam terselesaikannya penyusunan Tugas Akhir ini.
5. Ibu Harmini, ST, M.Eng, selaku Dosen Pembimbing II yang telah bersedia meluangkan waktunya untuk memberikan pengarahan, saran,

dan bimbingan materi serta berbagai kemudahan yang memungkinkan dalam terselesaikannya penyusunan Tugas Akhir ini.

6. Orang tua dan keluarga yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral.
7. Teman-teman angkatan yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
8. Marinta Hardiyanti yang telah membantu saya dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa penelitian ini tidak sempurna sebagaimana yang diharapkan, untuk itu saran dan kritik sangat diharapkan demi penyempurnaan skripsi ini. Semoga hasil penelitian ini dapat bermanfaat untuk para akademisi, praktisi ataupun untuk penelitian–penelitian selanjutnya. Akhir kata penulis mohon maaf atas kekurangan dan kesalahan yang ada pada penyusunan laporan ini. Semoga ini dapat bermanfaat bagi kita semua terutama bagi pihak yang berkepentingan.



USM

Semarang, 8 Juni 2020

Penulis

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Konsumsi energi listrik di Indonesia setiap tahunnya terus meningkat sejalan dengan peningkatan pertumbuhan ekonomi nasional. Oleh karena itu, prakiraan kebutuhan energi listrik jangka panjang di Indonesia sangat diperlukan agar dapat menggambarkan kondisi kelistrikan saat ini dan masa yang akan datang, dengan diketahuinya perkiraan kebutuhan energi listrik jangka panjang antara tahun 2003 hingga tahun 2020 akan dapat ditentukan jenis dan perkiraan kapasitas pembangkit listrik yang dibutuhkan di Indonesia selama kurun waktu tersebut (Muchlis dan Permana, 2013).

Salah satu pengembangan infrastruktur untuk mengatasi rasio elektrifikasi di Indonesia yang akhir tahun ini mencapai 99,99% yaitu dengan cara meningkatkan mandiri energi listrik 35.000 MegaWatt (MW) melalui Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) yang berdampak pada peningkatan beberapa aspek kesejahteraan meliputi ekonomi, sosial, dan lingkungan. Ketersediaan energi listrik yang efisien dengan harga terjangkau merupakan faktor yang penting untuk menunjang ekonomi masyarakat negara Indonesia. Saat ini, ketersediaan tenaga listrik nasional mengalami masalah karena keterbatasan *supply* dibandingkan dengan kebutuhan yang semakin meningkat.

Dengan meningkatnya kebutuhan listrik di Indonesia, maka dibutuhkan pembangkit listrik yang handal dengan efisiensi operasional yang maksimal, maksudnya adalah suatu pembangkit listrik yang hasil dari pengoperasiannya menghasilkan energi listrik yang efisien dan didasarkan pada aturan dan *standard* yang ada. Data yang dikumpulkan untuk menghitung nilai efisiensi unit GTG 2.3 diantaranya *temperature* udara lingkungan (T_1), *temperature* keluar kompresor (T_2), *temperature* keluar turbin (T_4), tekanan udara lingkungan (P_1), tekanan *absolute* (P_2), tekanan sisi luar turbin (P_4), dan daya output pada generator.

Berdasarkan buku dengan judul "*Gas Turbine Engineering Handbook 2nd*" disebutkan bahwa idealnya nilai efisiensi sistem pada unit GTG berkisar antara 30%-46% dengan kapasitas beban yang dihasilkan unit GTG tersebut sebesar 3 MW sampai dengan 480 MW (P. Boyce, 2001). Besarnya kapasitas energi listrik yang dihasilkan oleh sistem pembangkit dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya adalah efisiensi dari komponen yang ada pada sistem tersebut. PT Indonesia Power Semarang *Power Generation Unit* merupakan anak perusahaan dari PT PLN (PERSERO) yang merupakan salah satu pembangkit listrik yang mengelola 3 unit PLTU dan 2 blok PLTGU dengan kapasitas total daya terpasang sebesar 1.313,33 MW. Pada sistem pengoperasian PLTGU unit GTG 2.3 beroperasi secara terus menerus mulai dari beban dasar, beban menengah, hingga beban puncak sehingga perlu dianalisis efisiensi dari operasional sistem tersebut karena dapat berpengaruh pada penyaluran energi listrik.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah dipaparkan diatas, maka adapun permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana menghitung dan menganalisa nilai efisiensi kompresor, turbin, dan sistem operasional pada PLTGU unit GTG 2.3 PT. Indonesia Power Semarang *Power Generation Unit*?
2. Apa yang mempengaruhi besar atau kecilnya nilai efisiensi dari operasional sistem pada PLTGU unit GTG 2.3 PT. Indonesia Power Semarang *Power Generation Unit*?

1.3 Batasan Masalah

Terdapat batasan masalah pada penelitian ini, yaitu :

1. Data parameter yang diambil dari PLTGU Blok 2, unit GTG 2.3 PT. Indonesia Power Semarang *Power Generation Unit*.
2. Data yang digunakan pada perhitungan nilai efisiensi diperoleh dari data *temperature* udara lingkungan (T_1), *temperature* keluar kompresor (T_2), *temperature* keluar turbin (T_4), tekanan udara lingkungan (P_1), tekanan *absolute* (P_2), tekanan sisi luar turbin (P_4), dan daya *output* pada generator.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian Tugas Akhir ini adalah :

1. Menghitung besarnya nilai efisiensi kompresor, turbin, dan sistem operasional pada PLTGU unit GTG 2.3 PT. Indonesia Power Semarang *Power Generation Unit*.
2. Menganalisa hal-hal yang mempengaruhi besar dan kecilnya nilai efisiensi dari kompresor, turbin, dan sistem operasional pada PLTGU unit GTG 2.3 PT. Indonesia Power Semarang *Power Generation Unit*.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang akan didapat dari penulisan penelitian Tugas Akhir ini adalah memberikan kontribusi nyata bagi PT. Indonesia Power Semarang *Power Generation Unit* dalam upaya meningkatkan efisiensi pada unit pembangkitannya, khususnya pada PLTGU unit GTG 2.3.

1.6 Metodologi Penelitian

Terdapat beberapa metode yang akan dilakukan dalam menjawab permasalahan dalam penelitian ini, diantaranya :

1. Metode Interview

Metode pengumpulan data melalui wawancara dengan petugas berwenang yang telah ditunjuk untuk memberikan data mengenai objek yang diamati.

2. Metode Observasi

Metode pengumpulan data dengan melakukan pengamatan secara langsung pada objek atau peralatan komponen yang terdapat pada unit GTG 2.3 PT. Indonesia Power Semarang *Power Generation Unit*.

3. Metode Kepustakaan

Metode pengumpulan data dilakukan dengan membaca dan mempelajari buku-buku referensi yang ada di perpustakaan PT. Indonesia Power Semarang *Power Generation Unit* dan perpustakaan Universitas Semarang.

4. Metode Deskriptif Analitis

Metode ini digunakan untuk menyusun dan menyajikan data yang telah diperoleh dari lapangan dan disesuaikan dalam perhitungan.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika dalam penyusunan laporan penelitian ini terdiri dari lima bab yang saling berkaitan satu dengan yang lainnya. Sistematika tersebut antara lain sebagai berikut :

1. BAB I Pendahuluan

Pendahuluan berisi tentang hal-hal yang mendorong atau hal-hal yang melatarbelakangi pentingnya dilakukan penelitian ini. Komponen dalam bab ini antara lain: (1) Latar belakang masalah; (2) Perumusan masalah; (3) Batasan masalah; (4) Tujuan penelitian; (5) Manfaat penelitian; (6) Metodologi penelitian dan (7) Sistematika penulisan yang digunakan pada penelitian.

2. BAB II Dasar Teori

Dasar teori berisi tentang *review* terhadap teori/konsep yang terdapat dalam literatur tertentu yang relevan, yang ada pada Daftar Pustaka dan ada kaitannya dengan tema Tugas Akhir ini. Dasar teori juga

menguraikan hasil-hasil penelitian sebelumnya yang relevan dan landasan teori yang menguraikan penjabaran dari tinjauan pustaka.

3. BAB III Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian berisi tentang uraian metode atau pendekatan yang digunakan dalam menjawab permasalahan penelitian untuk mencapai tujuan penelitian secara rinci, singkat dan jelas. Metode pelaksanaan penelitian ini ditunjukkan dalam bentuk diagram alir atau *flowchart*.

4. BAB IV Analisa dan Pembahasan

Analisa dan pembahasan berisi tentang data hasil perhitungan untuk mengetahui besarnya efisiensi sistem yang terdapat pada unit GTG 2.3 serta analisis mengenai hasil dari perhitungan yang telah didapat.

5. BAB V Penutup

Penutup berisi tentang kesimpulan yang mengacu pada pada tujuan penelitian yang telah dituliskan pada bab pertama, serta saran tentang rekomendasi dan catatan mengenai kelemahan studi lanjutan yang mungkin bisa dikeluarkan.

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Berikut beberapa referensi yang menjadi tinjauan pustaka pada penelitian yang berjudul “Analisis Efisiensi Operasional Sistem PLTGU unit GTG 2.3 Di PT. Indonesia Power Semarang *Power Generation Unit*” ini, yaitu sebagai berikut.

Rahmat Kurniawan dan Mulfi Hazwi, tahun 2014 melakukan penelitian dengan judul “Analisa Performansi Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU) Sicanang Belawan”, disebutkan bahwa tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui besarnya nilai efisiensi yang diperoleh dari PLTGU. Metode penelitiannya menggunakan perhitungan dengan pola kombinasi 1-1-1 dan 2-2-1. Hasilnya yaitu pada pola kombinasi 1-1-1 daya yang dihasilkan sebesar 108.361 kW dengan efisiensi rata-rata 29.50% dan pola kombinasi 2-2-1 mempunyai efisiensi rata-rata 30% dengan daya *output* sebesar 152.040 kW (Kurniawan dan Mulfi Hazwi, 2014).

Kemudian merujuk ke penelitian yang ditulis oleh Miswandi dan Awaludin Martin, tahun 2015 dengan judul “Analisis Eksergi pada Ruang Bakar pada PLTG Lembu 20 MW”, disebutkan bahwa penelitian ini berisi tentang kinerja pembangkit listrik melalui eksergi pada kompresor dan turbin gas, serta mencari solusi agar dapat meningkatkan nilai efisiensi. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa pemusnahan eksergi tertinggi terjadi di ruang bakar

mencapai 21,98 MW (85,21%) dan sementara kompresor terendah 3,81 MW (14,79%) (Miswandi dan Martin, 2015).

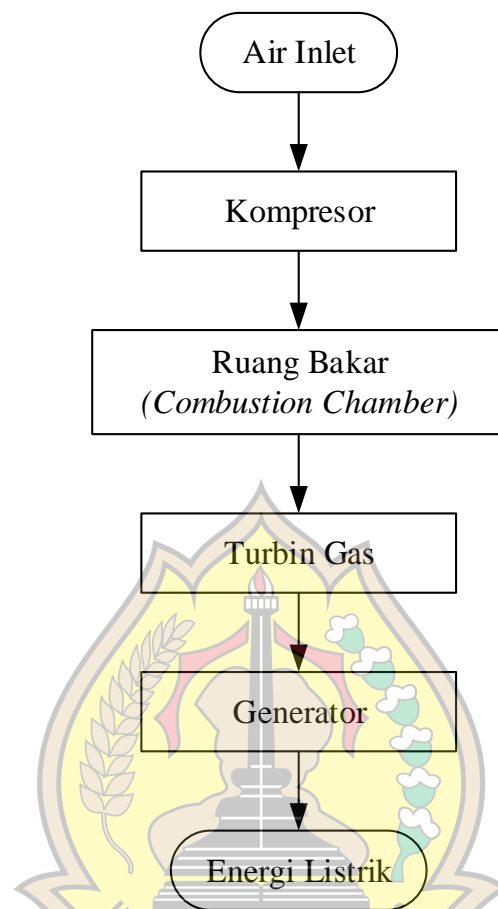
Penelitian yang berjudul “Analisa Efisiensi dan Pemanfaatan Gas Buang Turbin Gas Alstom pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas Kapasitas 20 MW” yang ditulis oleh Novi Gusnita dan Saputra Said tahun 2017, disebutkan bahwa penelitian ini membahas tentang perhitungan efisiensi thermal PLTG Balai-Pungut Duri. Hasil dari penelitian ini didapatkan efisiensi termal dari PLTG Balai-Pungut Duri sebesar 29,20% dengan kapasitas daya 20 MW. Kemudian, setelah dilakukan perhitungan penggabungan siklus yang memanfaatkan gas buang yang tidak dimanfaatkan, didapatkan hasil peningkatan efisiensi termal menjadi 52,41% dan peningkatan kapasitas daya keluaran menjadi 63,842 MW (Gusnita dan Said, 2017).

Selain itu, tahun 2017 Trisnanto Munandar melakukan penelitian dengan judul “Analisa Kinerja Generator Turbin Gas Terhadap Perubahan Beban Pada PT. Indonesia Power Unit Pembangkit Semarang”, tujuan penelitian ini adalah untuk menghitung beberapa parameter diantaranya tegangan induksi pada setiap perubahan beban, daya dan rugi-rugi daya pada setiap perubahan beban, serta efisiensi generator pada setiap perubahan beban. Hasil yang didapatkan dalam penelitian ini adalah pada beban 70-100 MW tegangan induksi yang dihasilkan adalah 15745.554-19087.140 Volt, GTG 1.2 adalah 15891.186-19148.701 Volt dan GTG 1.3 adalah 15910.053-19652.453 volt. Hasil perhitungan daya reaktif generator GTG 1.1 adalah (-6)-24 MVar, GTG 1.2 adalah 0-25 Mvar dan GTG 1.3 adalah 12-35,4 Mvar. Hasil perhitungan daya aktif GTG 1.1 adalah 70,892 MW-

100,611 MW, GTG 1.2 adalah 71,328 MW-101,227 MW dan GTG 1.3 adalah 71,134-100,921 MW. Hasil perhitungan daya semu GTG 1.1 adalah 71,083-101,325 MVA, GTG 1.2 adalah 72,330-102,191 MVA dan GTG 1.3 adalah 72,139-102,883 MVA. rugi-rugi daya yang dihasilkan GTG 1.1 adalah sebesar 5.3870 MW- 5.555 MW, pada GTG 1.2 adalah sebesar 5.321 MW- 5.411 MW dan pada GTG 1.3 adalah sebesar 5.307 MW-5.434 MW. Rata-rata efisiensi yang dihasilkan generator adalah sebesar 93,963%, GTG 1.2 adalah sebesar 94.033%, dan GTG 1.3 adalah sebesar 93.994% (Trisnanto, 2017).

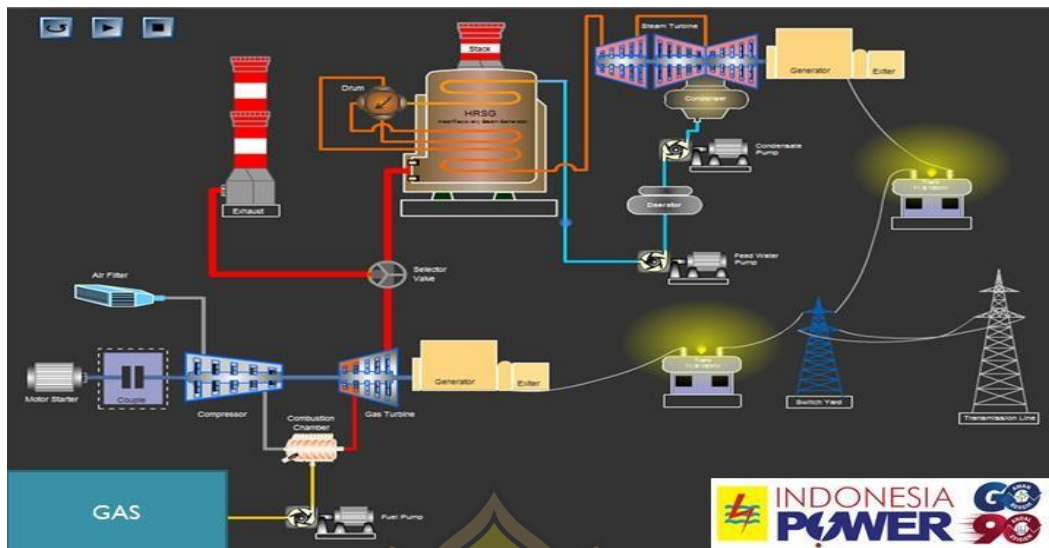
2.2 PLTGU (Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap)

Berdasarkan buku yang ditulis oleh PT. General Electric dengan judul “*Combined cycle power plant best practices 2015*” disebutkan bahwa secara umum proses produksi pada PLTGU merupakan gabungan dari PLTG dan PLTU. Selain itu, PLTGU juga dibagi menjadi dua siklus, yaitu siklus terbuka (*open cycle*), dimana pada siklus ini gas buangan dari turbin gas pada GTG langsung dibuang ke udara melalui cerobong *exhaust* dan siklus tertutup (*close cycle*), yang memanfaatkan kembali gas buang dari turbin gas pada GTG untuk memanaskan air yang berada pada HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*) (General Electric, 2015). Pada Gambar 2.1 dijelaskan mengenai blok diagram proses menghasilkan energy listrik yang ada pada GTG.



Gambar 2.1 Blok Diagram Proses Menghasilkan Energi Listrik Pada GTG

Pada proses pembangkitan listrik pada *Gas Turbine Generator* (GTG), *motor cranking* digunakan sebagai pemutar awal saat turbin belum menghasilkan tenaga dengan menggunakan energi listrik dari jaringan listrik. Motor ini berfungsi untuk memutar turbin mula-mula dan *compressor* yang digunakan untuk menghisap udara luar yang selanjutnya akan diubah menjadi udara berpartikel (*atomizing*) untuk proses pembakaran dan pendingin turbin. Siklus PLTGU secara lengkap dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Siklus PLTGU (Sumber : PT. Indonesia Power)

Bahan bakar yang digunakan untuk proses pembakaran berupa gas yang dialirkan melalui pipa bawah laut menuju GCV/SRV yang diatur tekanannya, kemudian dipompa menuju *combustion chamber* dan dicampur dengan udara yang berasal dari *compressor*, secara bersamaan busi (*spark plug*) memercikan api agar proses pembakaran dapat berlangsung.

Gas yang dihasilkan pada proses pembakaran di *combustion chamber* ini digunakan sebagai penggerak turbin gas yang menghasilkan energi mekanik dan selanjutnya energi tersebut diubah menjadi energi listrik menggunakan generator, pada sistem GTG ini *output* dayanya berkisar 93 MW dengan tegangan *output*nya 11,5 kV yang selanjutnya tegangan ini di *step up* menggunakan *transformator* menjadi 150 kV dan disalurkan menuju saluran transmisi.

Pada proses menghasilkan energi listrik pada unit STG (*Steam Turbin Generator*), penguapan airnya dibantu dengan gas hasil dari turbin gas pada GTG. Gas tersebut dialirkan terlebih dahulu melewati *dampers* menuju HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*). Air yang digunakan berasal dari sisa uap dari

turbin yang dikondensasikan pada *condenser*, tetapi air hasil kondensasi tersebut belum cukup digunakan untuk proses penguapan pada HRSG. Dibutuhkan sistem air penambah yang diperoleh dari hasil proses demineralisasi.

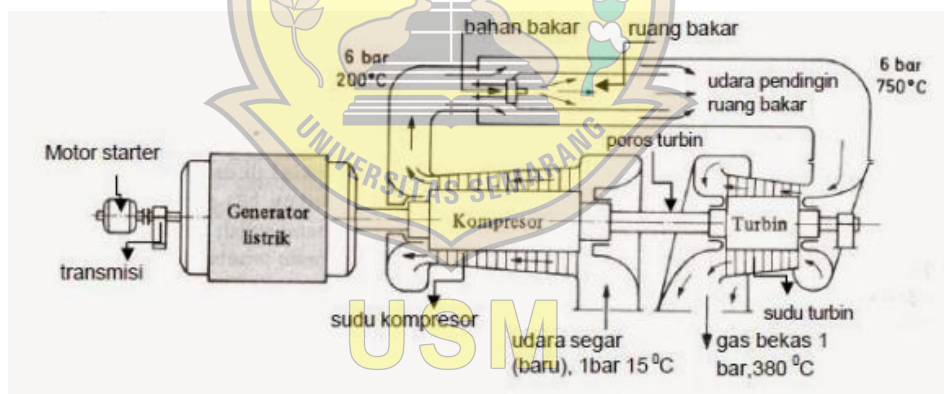
Proses demineralisasi tersebut berawal dari air laut yang dipompa dengan motor *Sea Water Supply pump* menuju *desalination plant* yang berfungsi untuk mengurangi kadar konduktivitas air dari 70 μS menjadi 10 μS dengan cara memanaskan air hingga menjadi uap dan mengubahnya kembali menjadi air, proses ini dilakukan sebanyak ± 20 kali. Air tersebut kemudian dipompa menggunakan *distillate water pump* menuju *make up water tank*, air pada tank ini dapat digunakan untuk kebutuhan sehari-hari. Proses selanjutnya yaitu menurunkan kadar konduktivitas air menjadi dibawah 1 μS dengan cara memompa air dari *make up water tank* menggunakan *make up water pump* menuju *poliser*. Pada *poliser* terjadi proses demineralisasi dan regenerasi, setelah itu air ditampung pada *demin water tank* dan dipompa menuju sisi *hot-well condensor* menggunakan motor *demin water pump*.

Air pada *condensor* tersebut dipompa menggunakan motor *condensate pump* menuju *deaerator* untuk memisahkan kandungan gas pada air, selanjutnya air yang sudah murni tersebut dipompa menuju HRSG menggunakan motor *feed water pump* untuk dipanaskan agar menghasilkan uap. Selanjutnya uap tersebut digunakan untuk memutar kedua turbin yaitu *Low Pressure (LP) Turbine* dan *High Pressure (HP) Turbine* untuk menghasilkan energi mekanik yang selanjutnya diubah menjadi energi listrik menggunakan generator. Daya output yang dihasilkan pada sistem STG berkisar 126 MW dengan tegangan 15 kV,

dimana tegangan ini akan *distep up* menggunakan *transformator* menjadi 150 kV dan disalurkan menuju saluran transmisi.

2.3 Komponen Pada GTG

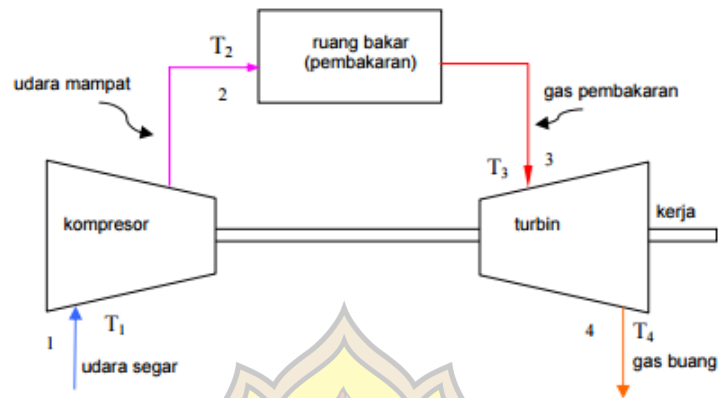
Berdasarkan penelitian dengan berjudul “Analisis Keandalan Pada Turbin Gas Di PT. Petrokimia Gresik-Jawa Timur”, disebutkan bahwa komponen yang terdapat pada GTG dapat dikategorikan menjadi 2 bagian, yaitu komponen utama yang terdiri dari kompresor, ruang bakar, dan turbin. Selain itu terdapat komponen pendukung yang terbagi atas beberapa sistem, yaitu sistem permulaan, sistem pemindah daya, sistem pembakaran, dan sistem pelumasan (Prastiko, 2015). Kopenen utama yang terdapat pada GTG dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Komponen Utama Pada GTG

Klasifikasi sistem kerja berdasarkan siklusnya, unit GTG 2.3 pada PT. Indonesia Power Semarang *Power Generation Unit* menggunakan siklus terbuka (*open cycle*) dan siklus tertutup (*close cycle*). Pada proses dari siklus terbuka, udara yang diperoleh dari udara bebas dikompresi yang selanjutnya dialirkan menuju ruang bakar untuk proses pembakaran. Setelah itu, hasil pembakarannya berekspansi pada turbin dan gas sisa hasil ekspansi tersebut kemudian dibuang

melalui *stack*. Skema sistem turbin gas dapat dilihat pada Gambar 2.4. Proses yang dikembangkan oleh Bryton (1873).



Gambar 2.4 Skema Sistem Turbin Gas Sederhana

Pada proses dari siklus tertutup, hasil pembakaran dan gas sisa hasil ekspansi pada turbin unit GTG dialirkan terlebih dahulu melewati *damper* menuju HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*) yang nantinya akan digunakan untuk memutar turbin pada unit STG (*Steam Turbin Generator*).

Turbin gas diklasifikasikan berdasarkan konstruksinya, dimana unit GTG 2.3 PT. Indonesia Power Semarang *Power Generation Unit* menggunakan turbin gas berporos tunggal (*single shaft*) yang tersusun dari turbin yang memiliki tekanan tinggi dan rendah. Fungsi dari turbin gas bertekanan tinggi yaitu untuk mensuplai gas panas menuju turbin bertekanan rendah. Turbin bertekanan rendah digunakan untuk memutar generator listrik. Berdasarkan arah aliran gasnya, turbin gas pada unit GTG 2.3 diklasifikasikan sebagai turbin aksial. Hal tersebut dikarenakan arah aliran fluidanya sejajar dengan poros turbin. Komponen yang terdapat pada GTG dapat dikategorikan menjadi 2 bagian, yaitu komponen utama dan komponen pendukung.

2.3.1 Komponen Utama

komponen utama pada unit GTG 2.3 PT. Indonesia Power Semarang *Power Generation Unit* terdiri dari tiga komponen yaitu kompresor, ruang bakar, dan turbin.

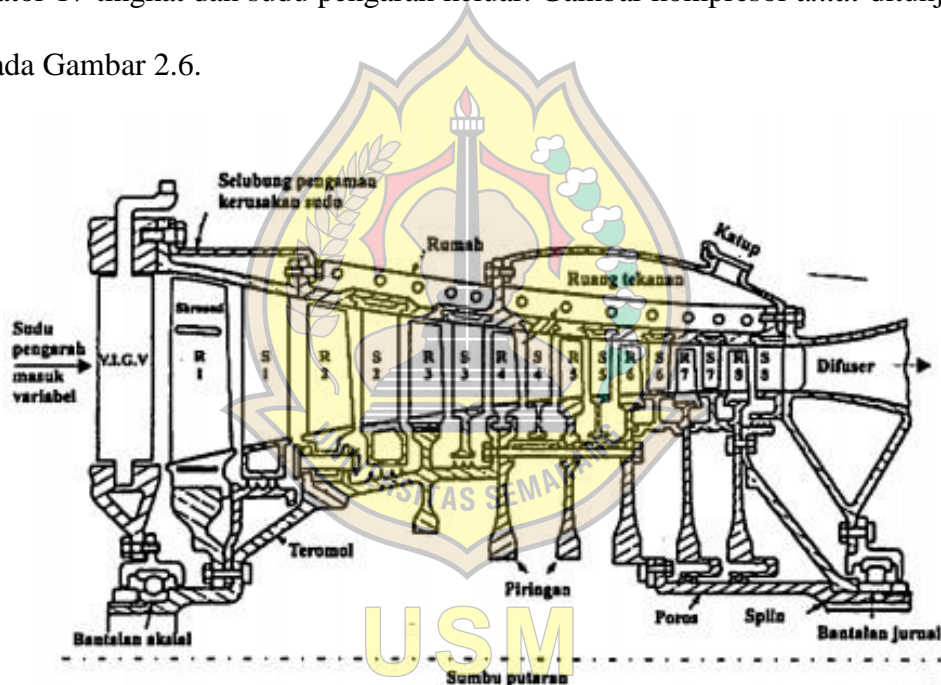
2.3.1.1 Kompresor

Kompresor adalah komponen pada GTG yang berfungsi meningkatkan tekanan udara. Udara tersebut diperoleh dari udara lingkungan yang dihisap melalui *air inlet*. Udara tersebut akan dikompresi pada tekanan tertentu lalu akan dialirkan ke *combustion chamber* oleh motor 88AB, hal tersebut bertujuan agar gas panas yang nantinya akan dihasilkan oleh *combustion chamber* memiliki *pressure* yang tinggi. Gambar kompresor pada unit GTG 2.3 ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Kompresor Unit GTG 2.3

Komponen utama pada bagian ini adalah *axial flow compressor*, berfungsi untuk mengkompresikan udara yang berasal dari *inlet air section* hingga bertekanan tinggi, sehingga pada saat terjadi pembakaran dapat menghasilkan gas panas berkecepatan tinggi yang dapat menimbulkan daya *output* turbin yang besar. Jenis kompresor yang digunakan adalah kompresor *axial* 17 tingkat dengan rasio tekanan 10 *bar*, yang terdiri dari sudu pengarah masuk, rotor dan stator 17 tingkat dan sudu pengarah keluar. Gambar kompresor *axial* ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Kompresor *Axial*

Sudu-sudu rotor kompresor terdiri dari 4 bagian utama, yaitu :

1. *Inlet casing* terletak pada ujung kompresor.
2. *Forward casing* yang terdiri dari 4 tingkat pertama.
3. *Aft casing* yang terdiri dari sudu kompresor tingkat 5 hingga 10.
4. *Discharge casing* yaitu bagian akhir pada kompresor yang terdiri atas 7 tingkat.

Nilai kerja kompresor dan nilai efisiensi pada kompresor dapat dihitung menggunakan persamaan 2.1 dan persamaan 2.2.

1. Menghitung kerja kompresor actual (W_{ca})

$$W_{ca} = \frac{\dot{m}_{ud} (h_2 - h_1)}{\eta_c} \dots \dots \dots (2.1)$$

2. Menghitung efisiensi kompresor (η_c)

$$\eta_c = \frac{h'_2 - h_1}{h_2 - h_1} \times 100\% \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana h'_2 adalah nilai entalpi dari T'_2 dihitung dengan rumus :

$$T'_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana :

\dot{m}_{ud} = laju aliran udara

h_1 = entalpi udara lingkungan

h_2 = entalpi udara kompresor

T_1 = *temperature* udara lingkungan

T'_2 = *temperature* udara keluar kompresor

P_1 = *pressure* udara lingkungan

P_2 = *pressure* keluar kompresor

k = konstanta rasio panas spesifik

2.3.1.2 Ruang Bakar (*Combustion Chamber*)

Ruang bakar merupakan komponen tempat terjadinya proses pembakaran. Udara yang telah dikompres tersebut memiliki *pressure* yang tinggi akan dicampur dengan bahan bakar gas dan terjadi proses pembakaran yang

dibantu dengan percikan api dari busi (*spark plug*). Proses ini berfungsi untuk menambahkan nilai kalor pada gas. Gambar *spark plug* ditunjukkan pada Gambar 2.7.



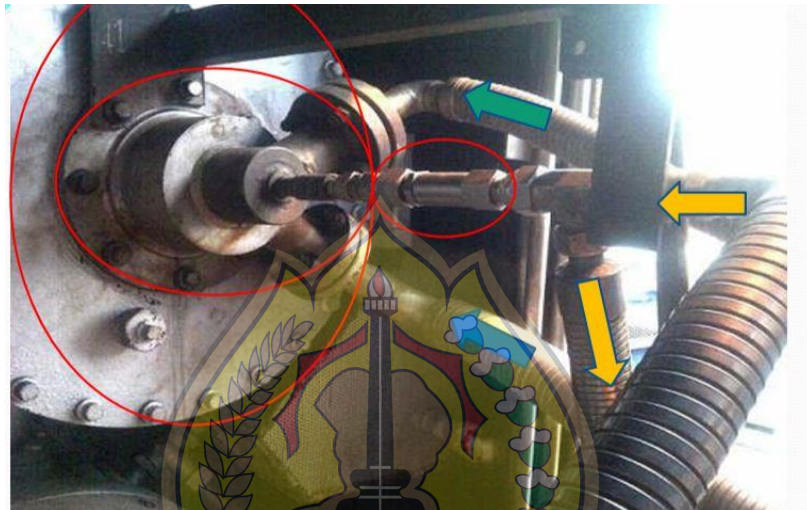
Gambar 2.7 *Spark Plug*

Terdapat beberapa bagian pada instalasi ruang bakar, antara lain sebagai berikut :

1. **Ruang bakar pembakaran (*casing*)**, merupakan tempat seluruh proses pembakaran yang digunakan untuk mencampurkan udara yang telah dikompres dengan bahan bakar yang masuk.
2. **Ruang bakar utama (*combustion liner*)**, berfungsi sebagai tempat berlangsungnya pembakaran yang memiliki sirip sebagai jalur masuknya udara menuju *combustion chamber* serta untuk mendinginkan *combustion liner* sendiri.
3. **Pematik nyala api (*spark plug*)**, berfungsi sebagai pematik api agar proses pembakaran dapat terjadi menggunakan arus listrik untuk

menciptakan percikan api yang digunakan pada proses awal penyalaan turbin gas.

4. *Nozzle (injector)*, digunakan untuk menyembrotkan bahan bakar gas pada *combustion liner* dan bercampur dengan udara.



Gambar 2.8 Ruang Bakar Pada Unit GTG 2.3

Pada gambar 2.8 dapat dilihat ruang bakar pada unit GTG 2.3, dimana gambar panah berwarna kuning merupakan saluran mengalirnya bahan bakar HSD (*High Speed Diesel*), panah berwarna biru merupakan saluran udara masuk, dan panah berwarna hijau merupakan saluran mengalirnya bahan bakar gas. Nilai kalor masuk (Q_{in}) dan laju aliran udara (\dot{m}_{ud}) dapat dihitung menggunakan persamaan 2.4 dan persamaan 2.5.

$$1. \quad Q_{in} = \dot{m}_{BB} \times NKBB \dots \dots \dots (2.4)$$

$$2. \quad \dot{m}_{ud} = \frac{Q_{in} - (\dot{m}_{BB} \cdot h_3)}{(h_3 - h_2)} \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana :

\dot{m}_{BB} = laju aliran bahan bakar

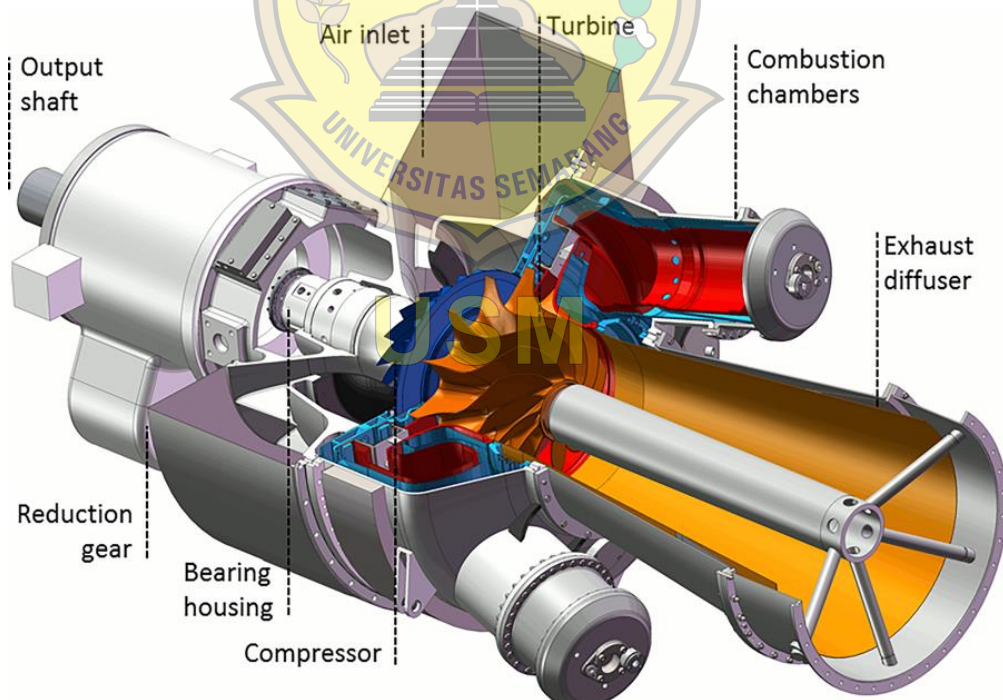
NKBB = nilai kalor bahan bakar

h_2 = entalpi udara lingkungan

h_3 = entalpi udara kompresor

2.3.1.3 Turbin Gas

Turbin gas adalah suatu mesin pengubah energi (*energy conversion machine*) yang memanfaatkan energi fluida berupa gas. Fungsi dari turbin gas adalah untuk menggerakkan beban seperti generator. Secara sederhana turbin terdiri beberapa bagian, yaitu *rotor* merupakan bagian yang berputar terdapat poros (*shaft*) dengan sudu-sudu (*blade*) yang terpasang pada *rotor*. *Rotor* ini dapat bekerja karena adanya dorongan fluida atau dapat dikatakan berputar akibat reaksi dari fluida. Gambar turbin secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Turbin Gas Keseluruhan

Terdapat beberapa komponen penyusun turbin gas ini, antara lain sebagai berikut :

1. **Turbin rotor case**, merupakan *casing* yang berfungsi untuk melindungi turbin.
2. **First stage nozzle**, digunakan sebagai pengarah gas panas menuju *first stage turbine wheel*.
3. **First stage turbine wheel**, digunakan untuk mengkonversi energi kinetik dari fluida berkecepatan tinggi menjadi energi mekanik yaitu putaran *rotor*.
4. **Second stage nozzle**, digunakan sebagai pengatur fluida menuju *second stage turbine*.
5. **Diafragma**, berfungsi sebagai pemisah antara dua *turbine wheel*.
6. **Second stage turbine**, digunakan untuk memanfaatkan energi kinetik yang tinggi dari *first stage turbine* agar kecepatan *rotor* yang dihasilkan lebih besar.
7. **Third stage nozzle**, dan **second wheel spacer** berfungsi untuk mengatur aliran gas panas ke *third turbine wheel*.
8. **Third turbine wheel**, berfungsi untuk memanfaatkan sisa energi kinetik yang masih ada dari *second turbine wheel*

Gambar turbin tampak luar unit GTG 2.3 dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Turbin Gas Tampak Luar Unit GTG 2.3

Berikut merupakan persamaan untuk menghitung kerja aktual turbin (W_{ta}), efisiensi turbin (η_t), efisiensi Efisiensi Sistem/thermal GTG (η_{th}) :

$$1. \quad W_{ta} = (\dot{m}_{ud} + \dot{m}_{BB}) \cdot (h_3 - h_4) \dots \dots \dots (2.6)$$

$$2. \quad \eta_t = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h'_4} \times 100\% \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana h'_4 adalah entalpi dari T'_4 , nilai dicari dengan rumus berikut :

$$T'_4 = T_3 \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{K-1}{K}} \dots \dots \dots (2.8)$$

$$3. \quad \eta_{th} = \frac{W_{ta} - W_{ca}}{\dot{m}_{BB} \times NK_{BB}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.9)$$

Dimana :

\dot{m}_{ud} = laju aliran udara

\dot{m}_{BB} = laju aliran bahan bakar

h_3 = entalpi udara lingkungan

h_4 = entalpi udara turbin

T_3 = *temperature* udara lingkungan

T'_4 = *temperature* udara keluar turbin

P_3 = *pressure* udara lingkungan

P_4 = *pressure* udara turbin

k = konstanta rasio panas spesifik

W_{ta} = kerja actual kompresor

W_{ca} = kerja actual turbin

NKBB = nilai kalor bahan bakar

2.3.2 Komponen Pendukung

komponen pendukung pada unit GTG 2.3 PT. Indonesia Power Semarang *Power Generation Unit* terdiri dari beberapa sistem, yaitu sistem permulaan, sistem pembakaran, sistem pelumasan dan sistem pendingin.

2.3.2.1 Sistem Permulaan

Sistem permulaan digunakan untuk melakukan *start up* unit sebelum turbin bekerja. Komponen yang digunakan sebagai sistem ini pada turbin gas dengan cara menggerakkan *motor cranking*, dimana posisi *motor cranking* terpasang satu poros dengan turbin, dimana ketika *motor cranking* dioperasikan maka turbin pada unit GTG akan ikut berputar. Gambar *motor cranking* ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Motor *Cranking*

2.3.2.2 Sistem Pembakaran

Bahan bakar yang digunakan pada sistem pembakaran yang terjadi pada unit GTG 2.3 ini menggunakan bahan bakar berupa gas alam (*compresses natural gas*), dimana gas alam tersebut memiliki tekanan sebesar 15 kg/cm^2 . Bahan bakar tersebut harus memiliki kondisi yang bersih dari partikel padat maupun cairan kondensat. Untuk mencapai kondisi yang diinginkan, sistem pembakaran ini dilengkapi *knock out drum* sebagai pemisah partikel padat dan cairan yang masih tersisa pada bahan bakar gas yang akan digunakan pada proses pembakaran.

2.3.2.3 Sistem Pelumasan

Sistem ini disirkulasikan pada bagian utama turbin gas, *thrust bearing*, *accessory gear*, dan beberapa bagian lainnya dan dilakukan secara kontinyu.

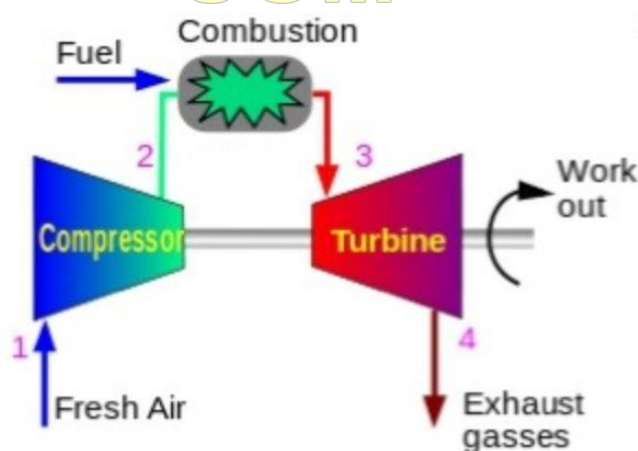
Sistem pelumasan terbagi menjadi beberapa bagian yaitu tangki pelumas, manometer pompa, sistem penyaring, sistem katup, sistem perpipaan, serta instrument yang digunakan sebagai pelumas.

2.3.2.4 Sistem Pendingin

Sistem pendingin digunakan untuk mendinginkan beberapa komponen pada *section* dan *bearing system* menggunakan air maupun udara. Komponen dari sistem ini terdiri dari *off base water cooling unit*, *lube oil cooler*, *main cooling water pump*, *temperature regulation valve*, *auxiliary water pump*, dan *low cooling water pressure switch*.

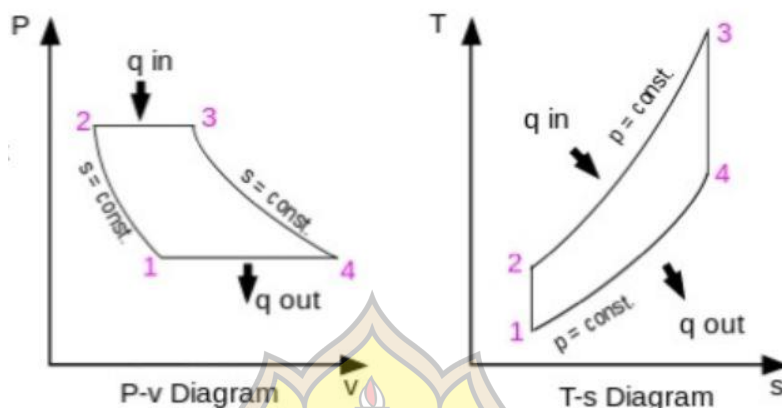
2.4 Siklus Brayton

Siklus *brayton* melibatkan tiga komponen utama yaitu kompresor, ruang bakar (*combustion chamber*), dan turbin. Secara garis besar siklus *brayton* menggunakan media kerja udara atmosfer masuk melalui sisi inlet kompresor, melewati ruang bakar, dan keluar kembali ke atmosfer setelah melewati turbin (Onny, 2016). Skema siklus *brayton* dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Skema Siklus *Brayton*

Untuk lebih jelasnya, siklus *brayton* yang digunakan pada unit GTG dapat dijelaskan pada diagram P-v dan diagram T-s yang terlihat pada gambar 2.13.



Gambar 2.13 Diagram P-v dan T-s Siklus *Brayton*

Siklus *brayton* terdiri dari 4 proses, yaitu proses kompresi isentropik, pembakaran isobarik, ekspansi isentropik, dan pembuangan panas.

1. Proses (1-2) yaitu **proses kompresi isentropik**, dimana udara atmosfer masuk ke dalam sistem turbin gas melalui sisi inlet kompresor. Oleh kompresor, udara dikompresikan sampai tekanan tertentu diikuti dengan volume ruang yang menyempit. Proses ini tidak diikuti dengan perubahan entropi, sehingga disebut proses isentropik.
2. Proses (2-3) yaitu **proses pembakaran isobarik**, dimana udara terkompresi masuk ke ruang bakar. Bahan bakar diinjeksikan ke dalam ruang bakar dan diikuti dengan proses pembakaran bahan bakar tersebut. Energi panas hasil pembakaran diserap oleh udara (q_{in}), meningkatkan temperatur udara, dan menambah volume udara. Proses ini tidak mengalami kenaikan tekanan udara, karena udara hasil proses

pembakaran bebas berekspansi ke sisi turbin. Karena tekanan yang konstan inilah maka proses ini disebut isobarik.

3. Proses (3-4) yaitu **proses ekspansi isentropik**, dimana udara bertekanan yang telah menyerap panas hasil pembakaran, berekspansi melewati turbin. Sudu-sudu turbin yang merupakan *nozzle-nozzle* kecil yang berfungsi untuk mengkonversikan energi panas udara menjadi energi kinetik. Sebagian energi tersebut dikonversikan turbin untuk memutar kompresor. Pada sistem pembangkit listrik turbin gas, sebagian energi lagi dikonversikan turbin untuk memutar generator listrik.
4. Proses (4-1) yaitu **proses pembuangan panas**, dimana udara dibuang kembali ke atmosfer. Pada siklus Brayton ideal, udara yang keluar dari turbin ini masih menyisakan sejumlah energi panas. Panas ini diserap oleh udara bebas, sehingga secara siklus udara tersebut siap untuk kembali masuk ke tahap 1-2 kembali.

2.5 Entalpi

Entalpi adalah istilah yang ditemukan di dalam termodinamika yang menyatakan jumlah energi internal yang terdapat di dalam sebuah sistem termodinamika ditambah dengan jumlah energi yang digunakan untuk melakukan aktifitas pada suatu materi. Total entalpi tidak dapat diukur secara langsung melainkan hanya dapat dinilai perubahannya saja. Secara sederhana entalpi merupakan proses perpindahan kalor yang terjadi secara konstan. Entalpi berkaitan dengan hukum pertama termodinamika yang berbunyi “energi dapat

diciptakan ataupun dihancurkan”. Perhitungan nilai entalpi dapat dihitung menggunakan metode interpolasi yang terdapat pada tabel gas ideal untuk mencari nilai entalpi yang akurat. Tabel gas ideal dapat dilihat pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2.

Tabel 2.1 Tabel Gas Ideal (1)

Ideal-gas properties of air											
T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s kJ/kg K	T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s kJ/kg K
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105	600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40902
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.44356
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917	630	638.63	19.84	457.78	92.84	2.46048
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	640	649.22	20.64	465.50	88.99	2.47716
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	650	659.84	21.86	473.25	85.34	2.49364
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	660	670.47	23.13	481.01	81.89	2.50985
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	670	681.14	24.46	488.81	78.61	2.52589
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	680	691.82	25.85	496.62	75.50	2.54175
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	690	702.52	27.29	504.45	72.56	2.55731
298	298.18	1.3543	212.64	631.9	1.69528	700	713.27	28.80	512.33	69.76	2.57277
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	720	734.82	32.02	528.14	64.53	2.60319
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	730	745.62	33.72	536.07	62.13	2.61803
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106	740	756.44	35.50	544.02	59.82	2.63280
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690	750	767.29	37.35	551.99	57.63	2.64737
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249	760	778.18	39.27	560.01	55.54	2.66176
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783	780	800.03	43.35	576.12	51.64	2.69013
340	340.42	2.149	242.82	454.1	1.82790	800	821.95	47.75	592.30	48.08	2.71787
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708	820	843.98	52.59	608.59	44.84	2.74504
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543	840	866.08	57.60	624.95	41.85	2.77170
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313	860	888.27	63.09	641.40	39.12	2.79783
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001	880	910.56	68.98	657.95	36.61	2.82344
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96633	900	932.93	75.29	674.58	34.31	2.84856
400	400.98	3.806	286.16	301.6	1.99194	920	955.38	82.05	691.28	32.18	2.87324
410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01699	940	977.92	89.28	708.08	30.22	2.89748
420	421.26	4.522	300.69	266.6	2.04142	960	1000.55	97.00	725.02	28.40	2.92128
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533	980	1023.25	105.2	741.98	26.73	2.94468
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870	1000	1046.04	114.0	758.94	25.17	2.96770
450	451.80	5.775	322.62	223.6	2.11161	1020	1068.89	123.4	776.10	23.72	2.99034
460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407	1040	1091.85	133.3	793.36	22.29	3.01260
470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604	1060	1114.86	143.9	810.62	21.14	3.03449
480	482.49	7.268	344.70	189.5	2.17760	1080	1137.89	155.2	827.88	19.98	3.05608
490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876	1100	1161.07	167.1	845.33	18.896	3.07732
500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952	1120	1184.28	179.7	862.79	17.886	3.09825
510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993	1140	1207.57	193.1	880.35	16.946	3.11883
520	523.63	9.684	374.36	154.1	2.25997	1160	1230.92	207.2	897.91	16.064	3.13916
530	533.98	10.37	381.84	146.7	2.27967	1180	1254.34	222.2	915.57	15.241	3.15916
540	544.35	11.10	389.34	139.7	2.29906	1200	1277.79	238.0	933.33	14.470	3.17888
550	555.74	11.86	396.86	133.1	2.31809	1220	1301.31	254.7	951.09	13.747	3.19834
560	565.17	12.66	404.42	127.0	2.33685	1240	1324.93	272.3	968.95	13.069	3.21751
570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531						

Tabel 2.2 Tabel Gas Ideal (2)

T K	h kJ/kg	P _r	u kJ/kg	v _r	s kJ/kg K	T K	h kJ/kg	P _r	u kJ/kg	v _r	s kJ/kg K
1260	1348.55	290.8	986.90	12.435	3.23638	1600	1757.57	791.2	1298.30	5.804	3.52364
1280	1372.24	310.4	1004.76	11.835	3.25510	1620	1782.00	834.1	1316.96	5.574	3.53879
1300	1395.97	330.9	1022.82	11.275	3.27345	1640	1806.46	878.9	1335.72	5.355	3.55381
1320	1419.76	352.5	1040.88	10.747	3.29160	1660	1830.96	925.6	1354.48	5.147	3.56867
1340	1443.60	375.3	1058.94	10.247	3.30959	1680	1855.50	974.2	1373.24	4.949	3.58335
1360	1467.49	399.1	1077.10	9.780	3.32724	1700	1880.1	1025	1392.7	4.761	3.5979
1380	1491.44	424.2	1095.26	9.337	3.34474	1750	1941.6	1161	1439.8	4.328	3.6336
1400	1515.42	450.5	1113.52	8.919	3.36200	1800	2003.3	1310	1487.2	3.994	3.6684
1420	1539.44	478.0	1131.77	8.526	3.37901	1850	2065.3	1475	1534.9	3.601	3.7023
1440	1563.51	506.9	1150.13	8.153	3.39586	1900	2127.4	1655	1582.6	3.295	3.7354
1460	1587.63	537.1	1168.49	7.801	3.41247	1950	2189.7	1852	1630.6	3.022	3.7677
1480	1611.79	568.8	1186.95	7.468	3.42892	2000	2252.1	2068	1678.7	2.776	3.7994
1500	1635.97	601.9	1205.41	7.152	3.44516	2050	2314.6	2303	1726.8	2.555	3.8303
1520	1660.23	636.5	1223.87	6.854	3.46120	2100	2377.7	2559	1775.3	2.356	3.8605
1540	1684.51	672.8	1242.43	6.569	3.47712	2150	2440.3	2837	1823.8	2.175	3.8901
1560	1708.82	710.5	1260.99	6.301	3.49276	2200	2503.2	3138	1872.4	2.012	3.9191
1580	1733.17	750.0	1279.65	6.046	3.50829	2250	2566.4	3464	1921.3	1.864	3.9474

Note: The properties P_r (relative pressure) and v_r (relative specific volume) are dimensionless quantities used in the analysis of isentropic processes, and should not be confused with the properties pressure and specific volume.

Source: Kenneth Wark, *Thermodynamics*, 4th ed. (New York: McGraw-Hill, 1983), pp. 78586, table A5. Originally published in J. H. Keenan and J. Kaye, *Gas Tables* (New York: John Wiley & Sons, 1948).

Dikarenakan data yang ada pada tabel Tabel 2.1 dan Tabel 2.2 tidak menyajikan nilai data sesuai dengan data yang ada di lapangan, maka diperlukan perhitungan dengan metode interpolasi untuk mencari nilai entalpi yang akurat dengan rumus berdasarkan persamaan 2.10.

$$Z_1 = \frac{(X_1 - X_{\text{bawah}})(Y_{\text{atas}} - Y_{\text{bawah}})}{(X_{\text{atas}} - X_{\text{bawah}})} + Y_{\text{bawah}} \dots \dots \dots (2.10)$$

Dimana :



Z = Nilai yang akan dicari menggunakan metode interpolasi

X₁ = Nilai yang sudah diketahui

X_{bawah} = Nilai titik bawah yang mendekati nilai X₁ pada tabel gas ideal

X_{atas} = Nilai titik atas yang mendekati nilai X₁ pada tabel gas ideal

Y_{bawah} = Nilai titik bawah selain X yang mendekati nilai X₁ pada tabel gas ideal

Y_{atas} = Nilai titik atas selain X yang mendekati nilai X₁ pada tabel gas ideal

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab 3 ini akan dijelaskan tentang metode yang dilakukan dalam memperoleh tujuan dari penelitian tugas akhir ini melalui data yang diperoleh dan selanjutnya akan diolah menggunakan perhitungan untuk mendapatkan hasil dari penelitian yang telah dilaksanakan.

3.1 Tempat Penelitian

Selama proses pengambilan data pada penelitian ini berada di PT. Indonesia Power Semarang *Power Generation Unit*, yang terletak di jalan Ronggowarsito Komplek Pelabuhan Tanjung Emas, Semarang, Indonesia. Lokasi PT. Indonesia Power Semarang *Power Generation Unit* dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Lokasi PT. Indonesia Power Semarang PGU

3.2 Alat dan Bahan

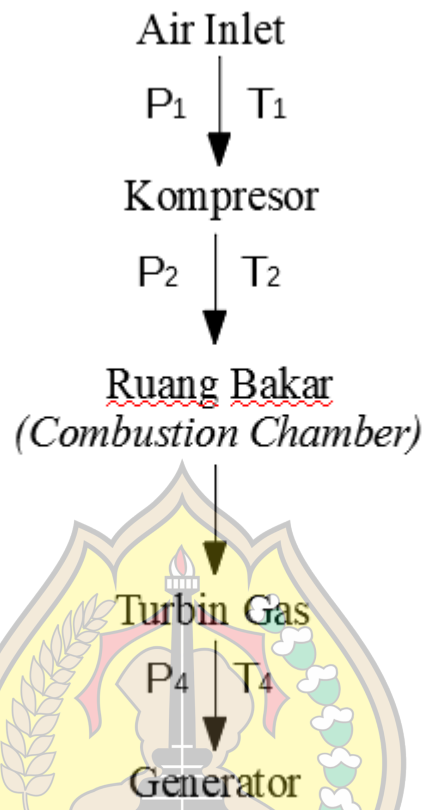
3.2.1 Alat Pengujian

Alat yang digunakan untuk melakukan penelitian mengenai analisis efisiensi sistem pada unit GTG 2.3 ini sebagai berikut :

1. *Software* MarkV.
2. Komputer dengan sistem DCS (*Distributed Control System*).
3. Laptop ASUS A455L.
4. Kalkulator *Scientific*.

3.2.2 Bahan Pengujian

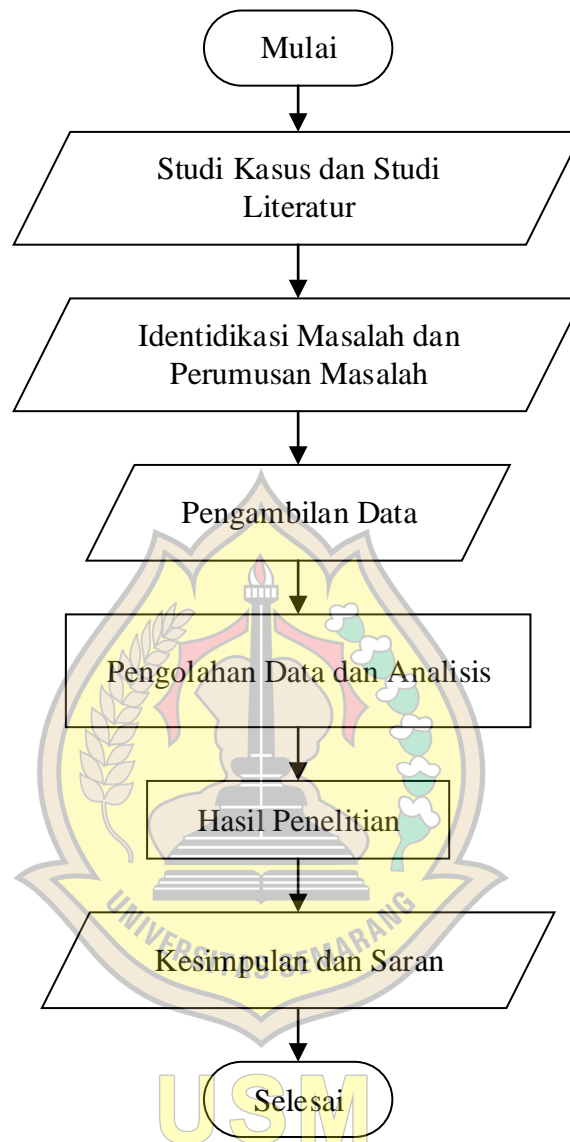
Bahan yang digunakan selama proses penelitian ini yaitu data P_1 (tekanan udara lingkungan), P_2 (tekanan keluar kompresor/*absolute*), P_4 (tekanan diluar turbin), T_1 (*temperature* udara lingkungan), T_2 (*temperature* keluar kompresor), T_4 (*temperature* keluar turbin), dan daya output generator yang diperoleh dari *trending* data operator serta data massa jenis bahan bakar dan nilai kalor bahan bakar yang diperoleh dari divisi EPMO (Energi Primer dan Material Operasi) PT. Indonesia Power Semarang *Power Generation Unit*. Pada Gambar 3.2 dijelaskan mengenai proses pembakaran pada unit GTG.



Gambar 3.2 Proses Pembakaran Pada Unit GTG

3.3 Sistematika Penulisan

Sistematika penelitian dan penulisan Tugas akhir ini terbagi dalam 6 tahapan yang dapat dilihat pada diagram alir yang terdapat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Diagram Alir Proses Pengerjaan Tugas Akhir

1. Studi Kasus dan Studi Literatur

Studi kasus adalah suatu metode yang digunakan untuk menyelidiki serta mempelajari suatu objek. Proses studi kasus dilakukan dengan cara mempelajari buku maupun jurnal, melakukan observasi masalah secara langsung di lapangan, dan melakukan wawancara kepada pihak yang mengetahui bidang tersebut. Studi literatur dilakukan agar

mendapatkan gambaran secara umum tentang penelitian yang dibahas, meliputi latar belakang masalah hingga mengenai analisis dari efisiensi pada unit GTG 2.3 yang sebelumnya sudah dijelaskan pada Bab 2.

2. Identifikasi dan Perumusan Masalah

Identifikasi masalah dilakukan untuk mengetahui permasalahan yang terdapat di lapangan. Setelah masalah diketahui, dilakukan perumusan masalah untuk dijadikan acuan selama proses penelitian yang dilaksanakan serta perancangan konsep pada target dalam penyelesaian.

3. Pengambilan Data

Proses pengambilan data dilakukan untuk mendukung proses perhitungan analisis efisiensi dari sistem pembangkit yang dilakukan langsung di lapangan dengan cara melakukan pengamatan, wawancara dengan pihak yang berkompeten pada bidangnya, dan melakukan pengumpulan berbagai data yang berkaitan dengan Tugas Akhir ini. Data yang dikumpulkan berupa data sekunder, berupa : *temperature* udara lingkungan (T_1), *temperature* keluar kompresor (T_2), *temperature* keluar turbin (T_4), tekanan udara lingkungan (P_1), tekanan *absolute* (P_2), tekanan sisi luar turbin (P_4), dan daya output pada generator. Data-data tersebut diperoleh dari bagian operator menggunakan *software* Mark V. Selain itu diperlukan data bahan bakar berupa nilai massa jenis dan nilai kalor, dimana data tersebut didapatkan dari divisi EPMO (Energi Primer dan Material Operasi).

4. Pengolahan Data dan Analisis

Setelah data yang diperlukan sudah terkumpul, langkah selanjutnya yaitu melakukan pengolahan data berupa perhitungan dengan rumus yang sudah tertera pada dasar teori. Kemudian hasil dari perhitungan tersebut dianalisis secara sistematis.

5. Hasil penelitian

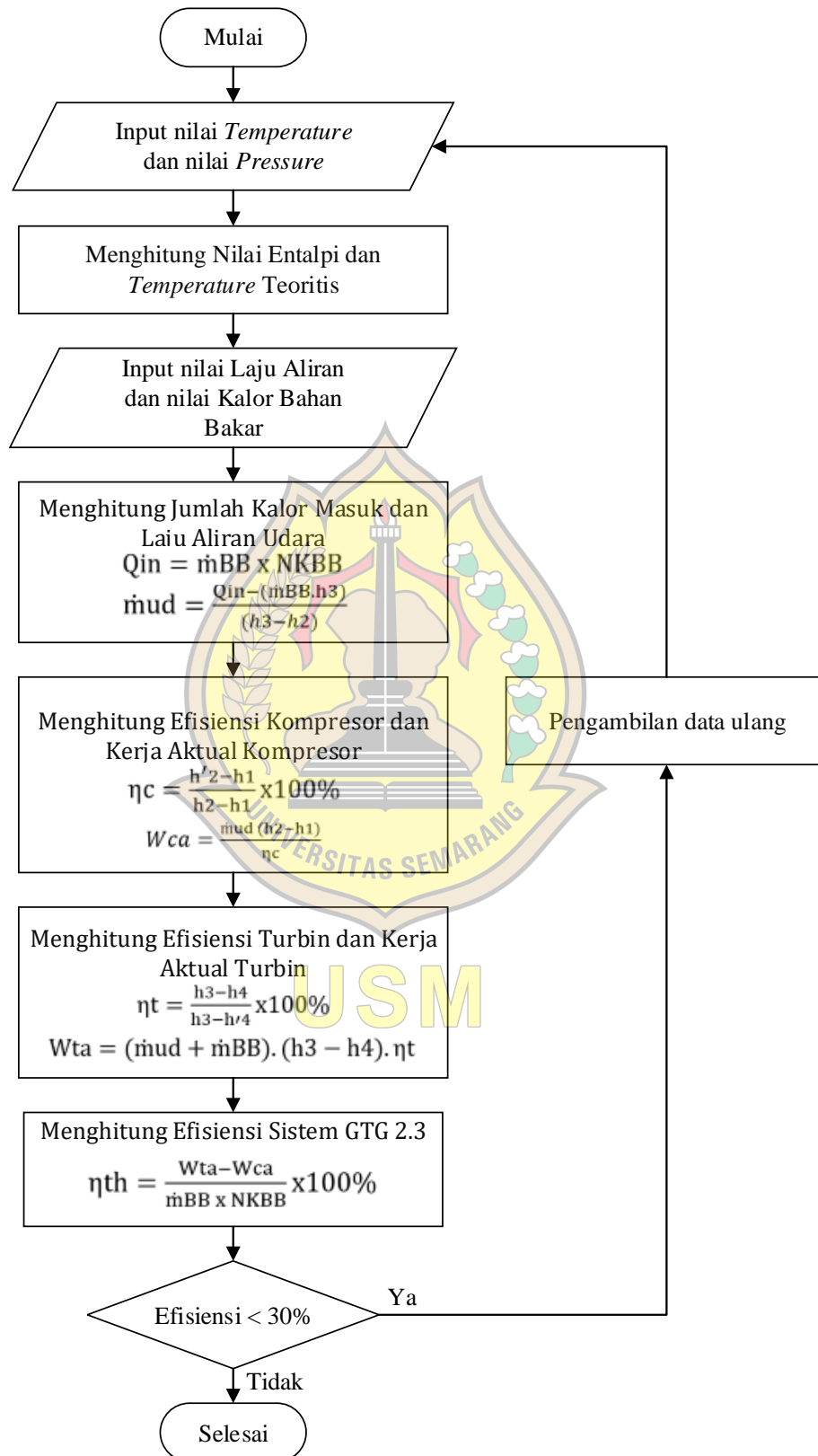
Hasil penelitian diperoleh dari hasil perhitungan yang telah dianalisis dan diolah dalam bentuk tabel maupun grafik.

6. Kesimpulan dan Saran

Tahapan terakhir adalah kesimpulan mengenai hasil dari penelitian yang diselaraskan dengan tujuan penelitian yang dilakukan. Selain kesimpulan terdapat saran untuk pembaca mengenai penelitian yang telah dilakukan.

3.4 Sistematika Pengolahan Data

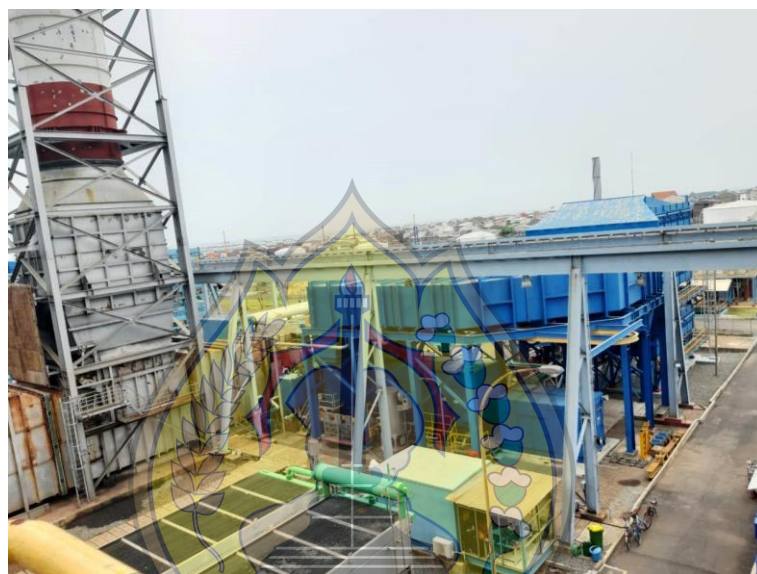
Sistematika pengolahan data yang akan dibahas pada bab selanjutnya dapat dilihat pada diagram alir (*flowchart*) yang terdapat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Diagram Alir (*Flowchart*) Proses Pengolahan Data

3.5 Data Spesifikasi Unit GTG 2.3

Penelitian dan pengambilan data Tugas Akhir ini dilaksanakan di PT. Indonesia Power Semarang *Power Generation Unit*. Pada Gambar 3.5 ditunjukkan unit GTG 2.3 keseluruhan.



Gambar 3.5 Unit GTG 2.3 Keseluruhan

Pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2 dijelaskan mengenai data spesifikasi performansi unit GTG 2.3 dan spesifikasi gas turbin unit GTG 2.3 yang ada di PT. Indonesia Power Semarang *Power Generation Unit*.

Tabel 3.1 Spesifikasi Performansi Unit GTG 2.3

No	Data Performansi Unit GTG	Base Load	Load 75%	Load 50%
1	<i>Generator Output (kw)</i>	109710	82290	54840
2	<i>Air Flow (kg/s)</i>	383	315	316
3	<i>Fuel Flow (kg/s)</i>	8.14	6.1	4.6
4	<i>Heat Rate (kJ/kWh)</i>	11107	-	-
5	<i>Exhaust Gas Flow (kg/s)</i>	391	321.5	320.8
6	<i>Exhaust Gas Temperature (°C)</i>	550.8	552.7	447.3
7	<i>Exhaust Pressure (mbar gauge)</i>	1.045	1.045	1.045
8	<i>NO_x Emmision</i>	171	-	-

Tabel 3.2 Spesifikasi Gas Turbin Unit GTG 2.3

No	Peralatan	Spesifikasi	
1	Rotor	<i>Manufacturer</i>	<i>GENERAL ELECTRIC</i>
		<i>Number of Shaft</i>	1 / Single shaft
		<i>Number of Bearing</i>	3
		<i>Type</i>	<i>Axial rotor</i>
		<i>Turbine Shaft Speed (rev/min)</i>	3600
2	Air Compressor	<i>Type</i>	<i>Axial-flow</i>
		<i>Number of Stages</i>	17
3	Turbine	<i>Type</i>	<i>Axial-flow</i>
		<i>Number of Stages</i>	3
4	Combustion Chambers	<i>System</i>	<i>Reverse-flow type</i>
		<i>Number of Combustors</i>	14
		<i>Number of Cross Fire Tubes</i>	14
5	Transition Pieces	<i>Number of Transition Pieces</i>	14
6	Ignitors	<i>Type</i>	<i>Electrode Spark Plugs</i>
		<i>Number</i>	2
7	Flame Detectors	<i>Type</i>	<i>Ultraviolet Flame Sensor</i>
		<i>Number</i>	4
8	Fuel Nozzle	<i>Type</i>	<i>Dual Fuel</i>
		<i>Number</i>	14
9	Main Fuel Pump	<i>Type</i>	<i>Screw Pump (Shaft Driven)</i>
		<i>Manufacturer</i>	<i>Warren Pumps.Inc</i>
		<i>Model</i>	B-2216
		<i>Number</i>	1
		<i>Speed</i>	1550 rpm
		<i>Head</i>	1000 psig

3.6 Data Operasi Unit GTG 2.3

Data operasi berupa T_1 , T_2 , P_2 , T_4 , mBB, dan NKBB unit GTG 2.3 pada tanggal 2 Februari 2020 dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Data Operasi Unit GTG 2.3 Tanggal 2 Februari 2020

Jam	*Load (MW)	**T ₁ (°C)	***T ₂ (°C)	****P ₂ (bar)	*****T ₄ (°C)	*****mBB (kg/s)	*****NKBB (kJ/kg)
01.00	94.91	27.50	342.76	9.38	560.92	5.93	54386.82
02.00	94.91	28.40	343.94	9.40	559.95	5.92	54386.82
03.00	94.84	27.40	342.83	9.42	558.15	5.93	54386.82
04.00	94.84	26.95	341.38	9.37	560.99	5.93	54386.82
05.00	95.11	28.20	343.46	9.42	560.06	5.87	54386.82
06.00	94.59	28.20	343.32	9.42	558.84	5.92	54386.82
07.00	79.63	28.06	329.67	8.27	560.30	5.22	54386.82
08.00	80.27	29.55	330.72	8.29	558.84	5.25	54386.82
09.00	84.77	29.31	334.71	8.62	561.13	5.48	54386.82
10.00	84.95	30.11	335.65	8.67	559.57	5.47	54386.82
11.00	85.14	30.73	337.14	8.66	560.33	5.48	54386.82
12.00	84.77	31.39	337.76	8.66	559.15	5.45	54386.82
13.00	85.03	30.63	337.03	8.71	558.70	5.46	54386.82
14.00	85.47	30.07	336.06	8.68	558.74	5.44	54386.82
15.00	85.67	30.07	337.24	8.67	558.46	5.47	54386.82
16.00	85.19	29.62	335.75	8.67	560.02	5.43	54386.82
17.00	75.09	28.89	328.01	8.10	549.36	5.00	54386.82
18.00	75.02	27.47	326.34	8.11	543.22	5.02	54386.82
19.00	94.92	27.09	341.93	9.36	559.53	5.93	54386.82
20.00	75.42	27.33	325.85	8.13	543.56	5.02	54386.82
21.00	69.59	27.29	323.22	8.00	524.57	4.75	54386.82
22.00	70.09	27.61	323.32	8.00	525.51	4.76	54386.82
23.00	70.78	27.26	323.74	8.01	525.47	4.77	54386.82
24.00	67.77	26.95	322.00	7.96	515.47	4.65	54386.82

Keterangan :

*Load : daya output yang dihasilkan

**T₁ : temperatur masuk kompresor

***T₂ : temperatur keluar kompresor

****P₂ : tekanan keluar kompresor

*****T₄ : temperatur keluar turbin

*****mBB : laju aliran bahan bakar

*****NKBB : nilai kalor bahan bakar

BAB IV

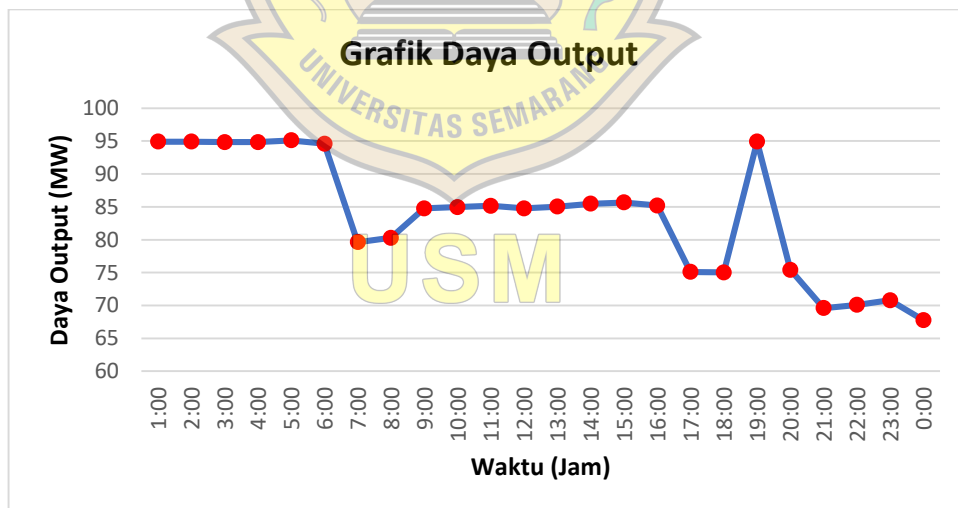
ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Nilai Rata-Rata Data Operasi Unit GTG 2.3

Berdasarkan data operasi unit GTG 2.3 yang terdapat pada Tabel 3.1, akan diperlihatkan nilai rata-rata dari setiap parameter yang diambil untuk dijadikan nilai pada perhitungan. Supaya lebih jelas, data yang ada disajikan menggunakan gambar berupa grafik

4.1.1 Daya Output

Berdasarkan data yang ada pada Tabel 3.3, maka diperoleh nilai rata-rata daya *output* yang dihasilkan pada unit GTG 2.3 dapat dilihat pada Gambar 4.1.



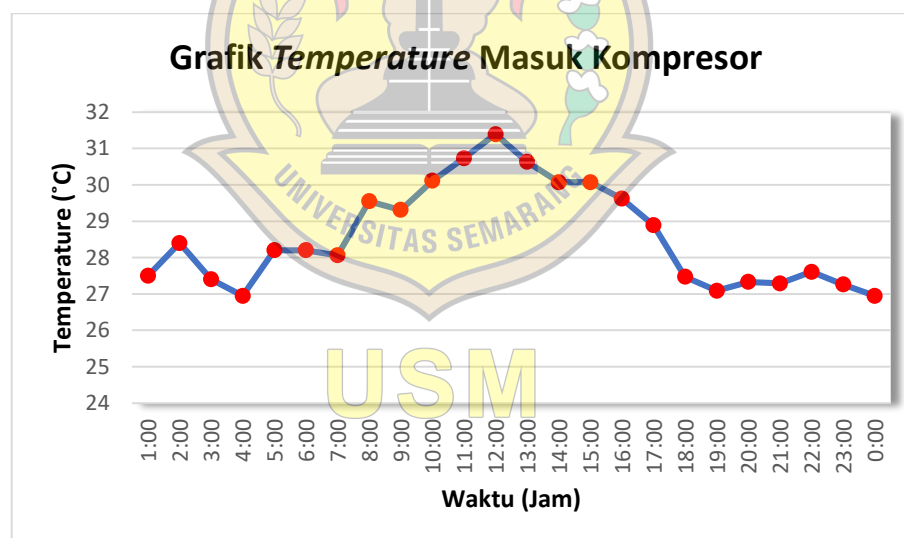
Gambar 4.1 Grafik Daya *Output* Unit GTG 2.3

Fluktuasi nilai daya yang dihasilkan pada unit GTG 2.3 dipengaruhi oleh kebutuhan beban yang digunakan konsumen yang nilainya diatur oleh pembagi beban (PLN). Penggunaan beban tertinggi berkisar mulai dari pukul 01:00 hingga pukul

6:00, serta pada pukul 19:00. Daya yang dihasilkan mempengaruhi nilai efisiensi pada sistem. Semakin besar daya yang dihasilkan maka nilai efisiensinya semakin baik, tetapi hal tersebut juga dipengaruhi oleh energi bahan bakar gas yang digunakan. Daya tertinggi yang dihasilkan unit GTG 2.3 yaitu sebesar 95.11 MW pada pukul 05:00, sedangkan daya terendahnya sebesar 67.77 MW pada pukul 24:00. Nilai rata-rata daya *output* yang dihasilkan unit GTG 2.3 yaitu sebesar 83.69 MW.

4.1.2 *Temperature* Masuk Kompresor

Berdasarkan data yang ada pada Tabel 3.3, maka diperoleh nilai rata-rata T_1 (*temperature* yang masuk ke dalam kompresor) pada unit GTG 2.3 dapat dilihat pada Gambar 4.2.



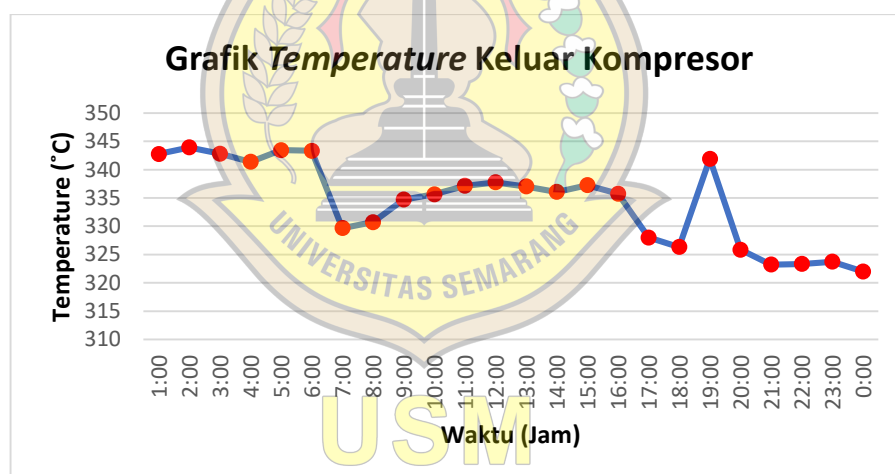
Gambar 4.2 Grafik *Temperature* Masuk Kompresor Unit GTG 2.3

T_1 merupakan *temperature* udara yang masuk pada kompresor atau disebut *temperature ambient*. Fluktuasi pada T_1 dipengaruhi oleh kelembaban udara dan cuaca. Besarnya nilai T_1 mempengaruhi proses kerja kompresor, semakin tinggi nilai T_1 maka akan semakin baik kerja kompresor. *Temperature* pada T_1 memiliki nilai tertinggi sebesar 31.39 °C pada pukul 12.00, hal tersebut dikarenakan

tingginya *temperature* pada siang hari, sedangkan nilai terendah T_1 sebesar 26.95 °C pada pukul 04.00 dan 00.00, hal tersebut dapat disebabkan oleh cuaca mendung atau memasuki malam atau pagi hari yang menyebabkan *temperaturnya* rendah. Nilai rata-rata *temperature* masuk kompresor yang ada pada unit GTG 2.3 yaitu sebesar 28.58 °C.

4.1.3 *Temperature* Keluar Kompresor

Berdasarkan data yang ada pada Tabel 3.3, maka diperoleh nilai rata-rata T_2 (*temperature* keluar kompresor) pada unit GTG 2.3 dapat dilihat pada Gambar 4.3.



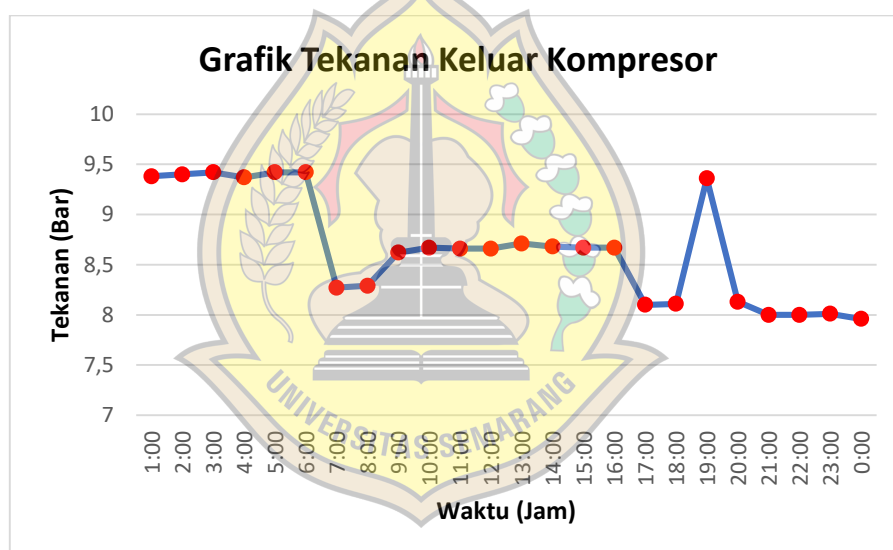
Gambar 4.3 Grafik *Temperature* Keluar Kompresor Unit GTG 2.3

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.3, *temperature* pada T_2 memiliki nilai tertinggi sebesar 343,94 °C pada pukul 02.00, hal tersebut dapat disebabkan oleh rendahnya *temperature* udara yang masuk pada kompresor, sedangkan nilai T_2 terendah sebesar 322 °C pada pukul 00.00, hal itu dikarenakan tingginya *temperature* udara yang masuk pada kompresor. Besarnya nilai T_2 dipengaruhi oleh rambatan *temperature* pada material turbin karena kompresor dirangkai

menyatu dengan turbin. *Temperature* udara yang masuk, tekanan udara, serta kebersihan dari sudu-sudu pada kompresor juga dapat mempengaruhi nilai pada T_2 . Nilai rata-rata T_2 (*temperature* keluar kompresor) yang ada pada unit GTG 2.3 yaitu sebesar 334.33 °C.

4.1.4 Tekanan Keluar Kompresor

Berdasarkan data yang ada pada Tabel 3.3, maka diperoleh nilai rata-rata P_2 (tekanan keluar kompresor) pada unit GTG 2.3 dapat dilihat pada Gambar 4.4.



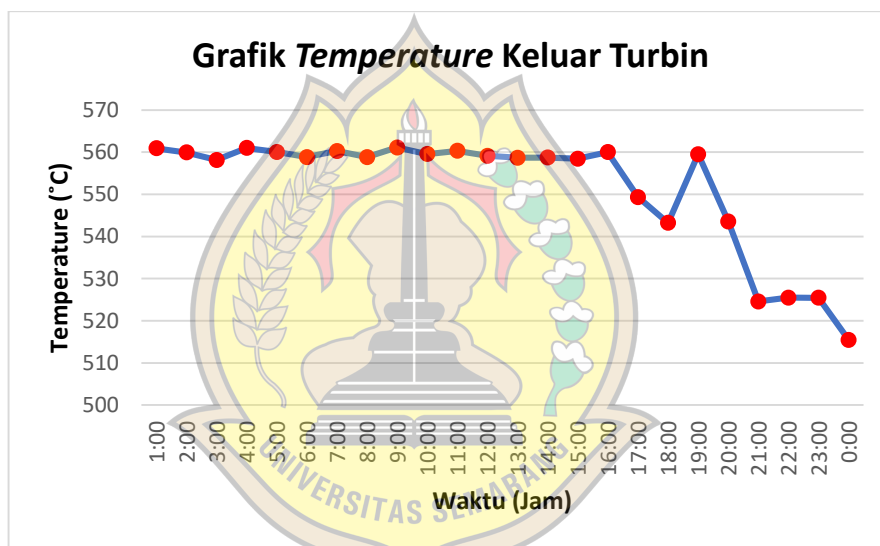
Gambar 4.4 Grafik Tekanan Keluar Kompresor Unit GTG 2.3

Nilai P_2 merupakan tekanan yang keluar dari kompresor. Berdasarkan grafik pada siklus *Bryton*, nilai P_2 sama dengan nilai P_3 . Tekanan yang dihasilkan ini dipengaruhi oleh kebersihan sudu-sudu kompresor dan *pressure* pada udara yang masuk pada kompresor. Berdasarkan data operasi yang telah diperoleh, nilai maksimal pada P_2 sebesar 9.42 bar yang terdapat pada pukul 03.00, pukul 05.00, dan pukul 06.00; hal tersebut disebabkan oleh bersihnya kondisi udara yang masuk pada kompresor, sedangkan nilai P_2 minimum sebesar 7.96 bar pada pukul

00.00, hal ini disebabkan kurang bersihnya udara yang masuk pada kompresor. Nilai rata-rata tekanan keluar kompresor yang ada pada unit GTG 2.3 yaitu sebesar 8.66 bar.

4.1.5 *Temperature* Keluar Turbin

Berdasarkan data yang ada pada Tabel 3.3, maka diperoleh nilai rata-rata T_4 (*temperature* keluar turbin) pada unit GTG 2.3 dapat dilihat pada Gambar 4.5.



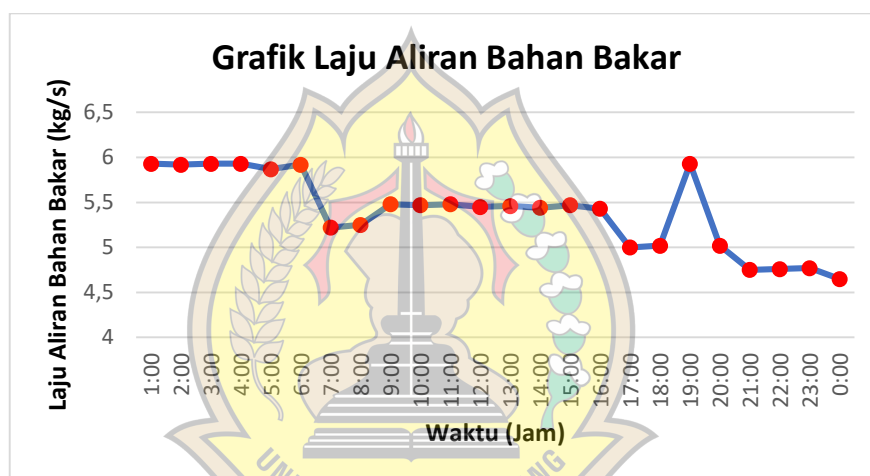
Gambar 4.5 Grafik *Temperature* Keluar Turbin Unit GTG 2.3

T_4 adalah nilai *temperature* yang keluar dari turbin atau *temperature* gas buang pada turbin. Besarnya nilai T_4 dipengaruhi oleh proses *combined cycle* yang membutuhkan *temperature* yang tinggi untuk gas buang pada turbin. Tingginya *temperature* pada T_4 mempengaruhi nilai efisiensi pada sistem GTG. Semakin tinggi nilai T_4 , maka efisiensi yang dihasilkan akan semakin baik, tetapi tingginya *temperature* tersebut memiliki batasan maksimal yang sudah ditentukan pada spesifikasi turbin yaitu sebesar 550.8 °C. *Temperature* tertinggi pada T_4 yaitu sebesar 561.13 °C pada pukul 09.00, nilai tersebut dipengaruhi oleh

besarnya laju aliran udara yang masuk pada kompresor, sedangkan *temperature* terendah pada T_4 sebesar $515.47\text{ }^{\circ}\text{C}$ pada pukul 00.00. Nilai rata-rata *temperature* yang keluar dari turbin pada unit GTG 2.3 yaitu sebesar $551.70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.1.6 Laju Aliran Bahan Bakar

Berdasarkan data yang ada pada Tabel 3.3, maka diperoleh nilai rata-rata mBB (laju aliran bahan bakar) pada unit GTG 2.3 dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Grafik Laju Aliran Bahan Bakar

Nilai maksimal laju aliran pada bahan bakar berdasarkan data operasi yang diperoleh yaitu sebesar 5.93 kg/s yang terdapat pada pukul 01.00, pukul 03.00, pukul 04.00, dan pukul 19.00, sedangkan nilai minimum laju aliran pada bahan bakar sebesar 4.65 kg/s pada pukul 00.00. Nilai laju aliran udara dipengaruhi oleh besarnya nilai daya yang dihasilkan dan nilai energi yang digunakan pada proses pembakaran. Laju aliran bahan bakar ini mempengaruhi proses pembakaran pada *combustion chamber*. Besarnya nilai ini harus disesuaikan dengan udara yang digunakan agar proses pembakaran dapat berlangsung secara optimal. Nilai rata-rata laju aliran bahan bakar pada unit GTG 2.3 yaitu sebesar 5.39 kg/s .

4.2 Perhitungan Nilai Efisiensi

Contoh perhitungan diambil dari salah satu data yaitu pada tanggal 2 Februari 2020 pukul 01:00.

4.2.1 Kondisi 1

Pada kondisi pertama, udara yang masuk ke kompresor diperoleh dari lingkungan (udara atmosfer) melalui *air inlet*. Nilai P_1 adalah tekanan atmosfer yang diperoleh dari hasil pengukuran menggunakan barometer yang tertera pada lampiran.

Diketahui :

$$P_1 = 76 \text{ mmHg} = 1.01325 \text{ bar}$$

$$T_1 = 27.5 \text{ }^\circ\text{C} = 300.65 \text{ K}$$

$$T_{\text{atas}} = 305 \text{ K}$$

$$T_{\text{bawah}} = 300 \text{ K}$$

$$h_{\text{atas}} = 305.22 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{\text{bawah}} = 300.19 \text{ kJ/kg}$$



Nilai entalpi udara dihitung menggunakan rumus interpolasi dan tabel termodinamika dari buku "*Thermodynamics An Engineering Approach 5th edition*" karangan Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles pada bagian Table A-17(A.Cengel and A.Boles, 2006).

$$h_1 = \frac{(T_1 - T_{\text{bawah}})(h_{\text{atas}} - h_{\text{bawah}})}{(T_{\text{atas}} - T_{\text{bawah}})} + h_{\text{bawah}}$$

$$h_1 = \frac{(300.65 - 300)(305.22 - 300.19)}{(305 - 300)} + 300.19$$

$$h_1 = 300.84 \text{ kJ/kg}$$

4.2.2 Kondisi 2

Pada kondisi ini udara akan dikompresikan menuju ruang bakar dengan diketahui data *temperature* dan tekanan dari tabel data operasi, untuk mencari nilai entalpi udaranya digunakan cara yang sama seperti sebelumnya (kondisi 1).

Diketahui :

$$P_2 = 9.38 \text{ bar}$$

$$T_2 = 342.76 \text{ }^\circ\text{C} = 615.91 \text{ K}$$

$$T_{\text{atas}} = 620 \text{ K}$$

$$T_{\text{bawah}} = 610 \text{ K}$$

$$h_{\text{atas}} = 628.07 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{\text{bawah}} = 617.53 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = \frac{(T_2 - T_{\text{bawah}})(h_{\text{atas}} - h_{\text{bawah}})}{(T_{\text{atas}} - T_{\text{bawah}})} + h_{\text{bawah}}$$

$$h_2 = \frac{(615.91 - 610)(628.07 - 617.53)}{(620 - 610)} + 617.53$$

$$h_2 = 623.76 \text{ kJ/kg}$$

Karena kondisi yang didapat merupakan kondisi ideal, kondisi ini berlangsung proses kompresi *isentropic* yang mendapatkan nilai Pr_1 sebagai berikut :

Diketahui :



$$T_1 = 27.5 \text{ }^\circ\text{C} = 300.65 \text{ K}$$

$$T_{\text{atas}} = 305 \text{ K}$$

$$T_{\text{bawah}} = 300 \text{ K}$$

$$Pr_{\text{atas}} = 1.4686$$

$$Pr_{\text{bawah}} = 1.3860$$

$$Pr_1 = \frac{(T_1 - T_{\text{bawah}})(Pr_{\text{atas}} - Pr_{\text{bawah}})}{(T_{\text{atas}} - T_{\text{bawah}})} + Pr_{\text{bawah}}$$

$$Pr_1 = \frac{(300.65 - 300)(1.4686 - 1.3860)}{(305 - 300)} + 1.3860$$

$$Pr_1 = 1.39$$

Dari nilai Pr_1 , dapat dihitung nilai dari Pr'_2 , sebagai berikut :

$$Pr'_2 = Pr_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

$$Pr'_2 = 1.39 \left(\frac{9.38}{1.01325} \right)$$

$$Pr'_2 = 12.87$$

Dari nilai Pr'_2 yang didapat, selanjutnya digunakan untuk mencari h'_2 (entalpi udara) menggunakan interpolasi dan tabel yang sama seperti sebelumnya.

Diketahui :

$$Pr_{\text{atas}} = 13.50$$

$$Pr_{\text{bawah}} = 12.66$$

$$h_{\text{atas}} = 575.59 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{\text{bawah}} = 565.17 \text{ kJ/kg}$$

$$h'_2 = \frac{(Pr'_2 - Pr_{\text{bawah}})(h_{\text{atas}} - h_{\text{bawah}})}{(Pr_{\text{atas}} - Pr_{\text{bawah}})} + h_{\text{bawah}}$$

$$h'_2 = \frac{(12.87 - 12.66)(575.59 - 565.17)}{(13.50 - 12.66)} + 565.17$$

$$h'_2 = 567.775 \text{ kJ/kg}$$

4.2.3 Kondisi 3

Pada kondisi ini terjadi proses pembakaran pada ruang bakar (*combustion chamber*), bahan bakar berupa gas akan dicampurkan dengan udara yang sebelumnya dikompresi pada kompresor dan pemantik api menggunakan *spark plug* yang digunakan agar proses pembakaran dapat berlangsung. Fluida dari hasil pembakaran tersebut akan keluar menuju turbin untuk menggerakkan sudu-sudu pada turbin yang akan mengubah energi fluida hasil pembakaran menjadi energi gerak.

Diketahui :

$$T_4 = 560.92 \text{ } ^\circ\text{C} = 834.07 \text{ K}$$

$$T_{\text{atas}} = 840 \text{ K}$$

$$T_{\text{bawah}} = 820 \text{ K}$$

$$Pr_{\text{atas}} = 57.60$$

$$Pr_{\text{bawah}} = 52.59$$

$$Pr_4 = \frac{(T_4 - T_{\text{bawah}})(Pr_{\text{atas}} - Pr_{\text{bawah}})}{(T_{\text{atas}} - T_{\text{bawah}})} + Pr_{\text{bawah}}$$

$$Pr_4 = \frac{(834.07 - 820)(57.60 - 52.59)}{(840 - 820)} + 52.59$$

$$Pr_4 = 56.11$$

Diasumsukan $P_3 = P_2$, ($P_3 = 9.38$ bar), maka :

$$Pr_3 = Pr_4 \left(\frac{P_3}{P_4} \right)$$

$$Pr_3 = 56.11 \left(\frac{9.38}{1.01325} \right)$$

$$Pr_3 = 519.43$$

Dari nilai Pr_3 yang didapat, selanjutnya digunakan untuk mencari h_3 (entalpi pada kondisi 3) menggunakan interpolasi dan tabel yang sama seperti sebelumnya.

Diketahui :

$$Pr_{atas} = 537.1$$

$$Pr_{bawah} = 506.9$$

$$h_{atas} = 1587.63 \text{ kJ/kg}$$

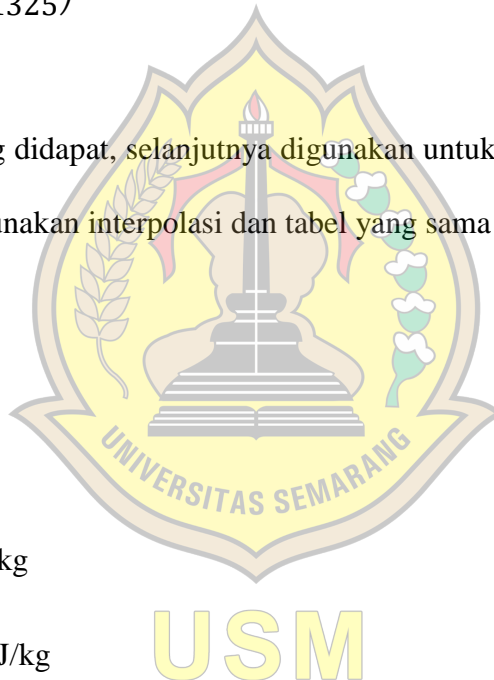
$$h_{bawah} = 1563.51 \text{ kJ/kg}$$

$$h_3 = \frac{(Pr_3 - Pr_{bawah})(h_{atas} - h_{bawah})}{(Pr_{atas} - Pr_{bawah})} + h_{bawah}$$

$$h_3 = \frac{(519.43 - 506.9)(1587.63 - 1563.51)}{(537.1 - 506.9)} + 1563.51$$

$$h_3 = 1573.52 \text{ kJ/kg}$$

Nilai T_3 tidak dapat diketahui oleh sistem karena nilai *temperaturnya* terlalu tinggi, maka dapat dihitung menggunakan interpolasi dan tabel gas ideal menggunakan hasil h_3 yang telah didapat sebelumnya.



Diketahui :

$$h_{\text{atas}} = 1587.63 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{\text{bawah}} = 1563.51 \text{ kJ/kg}$$

$$T_{\text{atas}} = 1460 \text{ K}$$

$$T_{\text{bawah}} = 1440 \text{ K}$$

$$T_3 = \frac{(h_3 - h_{\text{bawah}})(T_{\text{atas}} - T_{\text{bawah}})}{(h_{\text{atas}} - h_{\text{bawah}})} + T_{\text{bawah}}$$

$$T_3 = \frac{(1573.52 - 1563.51)(1460 - 1440)}{(1587.63 - 1563.51)} + 1440$$

$$T_3 = 1448.30 \text{ K}$$

4.2.4 Kondisi 4

Pada kondisi ini terjadi proses ekspansi gas buang dari hasil pembakaran pada turbin. *Temperature* gas buang ini menjadi lebih tinggi dari gas ideal, hal tersebut dikarenakan adanya proses gesekan antara gas hasil pembakaran dengan sudu-sudu pada turbin. Untuk mencari nilai entalpinya digunakan rumus interpolasi dan tabel gas ideal dengan nilai T_4 yang didapat melalui data operasi unit GTG 2.3.

Diketahui :

$$T_4 = 560.92 \text{ }^\circ\text{C} = 834.07 \text{ K}$$

$$T_{\text{atas}} = 840 \text{ K}$$

$$T_{\text{bawah}} = 820 \text{ K}$$

$$h_{\text{atas}} = 866.08 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{\text{bawah}} = 843.98 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = \frac{(T_4 - T_{\text{bawah}})(h_{\text{atas}} - h_{\text{bawah}})}{(T_{\text{atas}} - T_{\text{bawah}})} + h_{\text{bawah}}$$

$$h_4 = \frac{(834.07 - 820)(866.08 - 843.98)}{(840 - 820)} + 843.98$$

$$h_4 = 859.53 \text{ kJ/kg}$$

Karena didapat kondisi ideal pada kondisi ini, maka terjadi proses isentropis yang dapat dihitung dengan ketetapan konstanta k sebesar 1,4. Diasumsikan nilai $P_4 = P_1$

dan $P_2 = P_3$.

Diketahui :

$$P_4 = P_1 = 1.01325 \text{ bar}$$

$$P_2 = P_3 = 9.38 \text{ bar}$$

$$T'_4 = T_3 \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$T'_4 = 1448.30 \left(\frac{1.01325}{9.38} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}}$$

$$T'_4 = 766.87 \text{ K}$$

Dari hasil T'_4 yang telah didapat, maka selanjutnya dapat dihitung nilai h'_4 (entalpi isentropisnya).

Diketahui :

$$T_{\text{atas}} = 780 \text{ K}$$

$$T_{\text{bawah}} = 760 \text{ K}$$

$$h_{\text{atas}} = 800.03 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{\text{bawah}} = 778.18 \text{ kJ/kg}$$

$$h'_4 = \frac{(T'_4 - T_{\text{bawah}})(h_{\text{atas}} - h_{\text{bawah}})}{(T_{\text{atas}} - T_{\text{bawah}})} + h_{\text{bawah}}$$

$$h'_4 = \frac{(766.87 - 760)(800.03 - 778.18)}{(780 - 760)} + 778.18$$

$$h'_4 = 785.68 \text{ kJ/kg}$$

Pada tabel 4.1 dan tabel 4.2 dipaparkan hasil perhitungan pada kondisi 1 sampai kondisi 4 untuk mendapatkan nilai efisiensi pada tanggal 2 Februari 2020 dari pukul 1:00 sampai pukul 24:00.

Tabel 4.1 Hasil Perhitungan Kondisi 1 Sampai Kondisi 2

Jam	Kondisi 1	Kondisi 2			
	h1 (kJ/kg)	h2 (kJ/kg)	Pr1	Pr'2	h'2 (kJ/kg)
1:00	300.84	623.76	1.39	12.87	567.775
2:00	301.75	625.0	1.41	13.08	570.38
3:00	300.74	623.83	1.39	12.92	568.39
4:00	300.29	622.30	1.39	12.85	567.53
5:00	301.55	624.50	1.41	13.11	570.75
6:00	301.55	624.35	1.41	13.11	570.75
7:00	301.41	609.98	1.406	11.475	549.977
8:00	302.91	611.09	1.43	11.70	553.34
9:00	302.66	615.28	1.426	12.13	558.92
10:00	303.47	616.27	1.44	12.32	561.16
11:00	304.09	617.835	1.45	12.39	561.99
12:00	304.76	618.49	1.461	12.49	563.17
13:00	303.99	617.72	1.448	12.45	562.69
14:00	303.43	616.67	1.439	12.33	561.27
15:00	303.43	617.94	1.439	12.31	561.08
16:00	302.98	616.37	1.432	12.25	560.34
17:00	302.24	608.24	1.420	11.35	548.097
18:00	300.81	606.485	1.396	11.175	545.48

19:00	300.43	622.88	1.390	12.84	567.40
20:00	300.67	605.97	1.394	11.18	545.616
21:00	300.63	603.21	1.393	11.00	542.935
22:00	300.95	603.31	1.398	11.04	543.528
23:00	300.60	603.75	1.393	11.01	543.075
0:00	300.29	601.927	1.39	10.90	541.527

Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Kondisi 3 Sampai Kondisi 4

Jam	Kondisi 3				Kondisi 4		
	Pr4	Pr3	h3 (kJ/kg)	T3 (K)	h4 (kJ/kg)	T'4 (K)	h'4 (kJ/kg)
1:00	56.11	519.43	1573.52	1448.30	859.53	766.87	785.68
2:00	55.87	518.31	1572.62	1447.55	858.45	766.0	784.735
3:00	55.42	515.23	1570.16	1445.51	856.47	764.46	783.05
4:00	56.13	519.06	1573.22	1448.05	859.60	766.97	785.89
5:00	55.90	519.69	1.573.725	1448.47	858.58	766.02	784.76
6:00	55.60	516.90	1571.50	1.446.625	857.23	765.05	783.69
7:00	55.96	456.73	1520.86	1444.53	858.84	792.90	814.16
8:00	55.59	454.81	1519.18	1443.13	857.23	791.58	812.72
9:00	56.17	477.85	1539.31	1459.89	859.76	791.89	813.06
10:00	55.77	477.20	1538.74	1459.42	858.036	790.33	811.35
11:00	55.97	478.33	1.539.715	1420.23	858.875	769.36	788.406
12:00	55.67	457.80	1537.52	1418.40	857.57	768.37	787.32
13:00	55.56	477.59	1539.08	1419.70	857.07	767.81	786.71
14:00	55.57	476.03	1537.72	1418.56	857.12	767.95	786.86
15:00	55.50	474.88	1536.71	1417.73	856.81	771.89	791.17
16:00	55.89	478.22	1539.62	1420.15	855.53	769.06	788.08
17:00	53.22	425.43	1.492.566	1380.94	846.75	762.50	780.91
18:00	51.71	413.90	1481.61	1371.79	839.98	757.18	775.112
19:00	55.766	515.15	1.570.097	1445.46	857.99	765.88	784.606
20:00	51.494	413.17	1.480.915	1371.21	840.356	756.33	774.18
21:00	47.248	373.044	1.441.241	1.338.021	819.451	741.43	757.99
22:00	47.455	374.677	1442.95	1.339.454	820.481	742.22	758.85
23:00	47.446	375.076	1.443.366	1.339.803	820.437	742.153	758.776
0:00	45.246	355.452	1.422.846	1.322.589	809.477	733.930	749.872

4.2.5 Kalor Masuk

Nilai kalor masuk dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.4 dengan data laju aliran dan nilai kalor dari bahan bakar yang diperoleh dari data operasi unit GTG 2.3.

$$Q_{in} = \dot{m}_{BB} \times NK_{BB}$$

$$Q_{in} = 5.93 \times 54386.8$$

$$Q_{in} = 322513.724 \text{ kJ/s}$$

4.2.6 Laju Aliran Udara

Dari hasil perhitungan nilai kalor masuk, selanjutnya dapat dihitung nilai laju aliran udara yang masuk dengan menggunakan nilai h_3 dan h_2 yang telah didapat dari perhitungan sebelumnya. Perhitungan laju aliran udara dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.5

$$\dot{m}_{ud} = \frac{Q_{in} - (\dot{m}_{BB} \cdot h_3)}{(h_3 - h_2)}$$

$$\dot{m}_{ud} = \frac{322513.724 - (5.93 \times 1573.52)}{(1573.52 - 623.76)}$$

$$\dot{m}_{ud} = 329.75 \text{ kg/s}$$

4.2.7 Kerja Kompresor

1. Efisiensi Kompresor

Nilai efisiensi kompresor dihitung menggunakan rumus yang tertera pada Persamaan 2.2.

$$\eta_c = \frac{h'_2 - h_1}{h_2 - h_1} \times 100\%$$

$$\eta_c = \frac{567.775 - 300.84}{623.76 - 300.84} \times 100\%$$

$$\eta_c = 82.66\%$$

2. Kerja Aktual Kompresor

Nilai kerja aktual pada kompresor dihitung menggunakan Persamaan 2.1.

$$W_{ca} = \frac{\dot{m}_{ud} (h_2 - h_1)}{\eta_c}$$

$$W_{ca} = \frac{329.75 (623.76 - 300.84)}{82.66\%}$$

$$W_{ca} = 128820.31 \text{ kJ/s}$$

4.2.8 Kerja Turbin

1. Efisiensi Turbin

Besarnya nilai efisiensi pada turbin dapat diketahui dengan melakukan perhitungan menggunakan Persamaan 2.7.

$$\eta_t = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h'_4} \times 100\%$$

$$\eta_t = \frac{1573.52 - 859.53}{1573.52 - 785.68} \times 100\%$$

$$\eta_t = 90.63\%$$

2. Kerja Aktual Turbin

Nilai kerja aktual turbin dihitung menggunakan Persamaan 2.6.

$$W_{ta} = (\dot{m}_{ud} + \dot{m}_{BB}) \cdot (h_3 - h_4)$$

$$W_{ta} = (329.75 + 5.93) \cdot (1573.52 - 859.53)$$

$$W_{ta} = 239672.16 \text{ kJ/s}$$

4.2.9 Efisiensi Sistem

Nilai efisiensi sistem pada GTG 2.3 untuk data pada tanggal 2 Februari 2020 pukul 01.00 dihitung menggunakan persamaan 2.9.

$$\eta_{th} = \frac{W_{ta} - W_{ca}}{\dot{m}_{BB} \times NKBB} \times 100\%$$

$$\eta_{th} = \frac{239672.16 - 128820.31}{5.93 \times 54386.8} \times 100\%$$

$$\eta_{th} = 34.37\%$$

Hasil dari perhitungan nilai efisiensi unit GTG 2.3 selama 24 jam dapat dilihat pada Tabel 4.3.

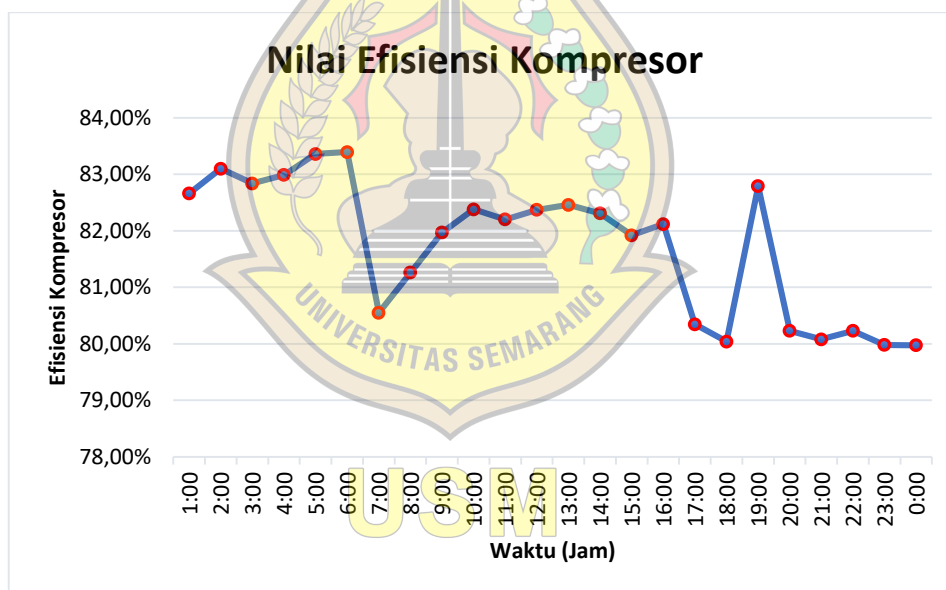
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Nilai Efisiensi Kompresor, Turbin, dan Sistem Unit GTG 2.3

No	Jam	Efisiensi Kompresor	Efisiensi Turbin	Efisiensi Sistem
1	1:00	82,66%	90,63%	34,37%
2	2:00	83,10%	90,46%	34,26%
3	3:00	82,84%	90,67%	31,90%
4	4:00	82,99%	90,64%	34,44%
5	5:00	83,36%	90,64%	34,84%
6	6:00	83,40%	90,67%	35,24%
7	7:00	80,55%	93,68%	30,99%
8	8:00	81,26%	93,67%	31,48%
9	9:00	81,97%	93,57%	32,60%
10	10:00	82,38%	93,58%	32,96%
11	11:00	82,20%	90,62%	32,78%
12	12:00	82,37%	90,64%	32,87%
13	13:00	82,46%	90,65%	33,05%
14	14:00	82,31%	90,64%	32,91%
15	15:00	81,92%	90,64%	33,31%
16	16:00	82,12%	91,03%	33,09%
17	17:00	80,35%	90,75%	30,33%
18	18:00	80,04%	90,82%	30,05%
19	19:00	82,79%	90,66%	34,39%
20	20:00	80,23%	90,64%	37,57%
21	21:00	80,08%	91,01%	29,48%

No	Jam	Efisiensi Kompresor	Efisiensi Turbin	Efisiensi Sistem
22	22:00	80,23%	90,99%	29,62%
23	23:00	79,98%	90,99%	36,69%
24	0:00	79,98%	91,14%	29,15%

4.3 Efisiensi Kompresor

Berdasarkan hasil perhitungan nilai efisiensi yang tertera pada Tabel 4.1 dapat diketahui nilai efisiensi tertinggi, terendah, dan rata-rata pada kompresor unit GTG 2.3 pada tanggal 2 Februari 2020 yang dapat dilihat datanya di dalam grafik pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Grafik Nilai Efisiensi Kompresor

Nilai efisiensi tertinggi dari kompresor sebesar 83.40% pada pukul 06:00 dan efisiensi terendahnya terdapat pada pukul 23:00 dan pukul 24:00 sebesar 79.98%. Nilai rata-rata efisiensi kompresor didapat sebesar 81.73%. Nilai efisiensi kompresor dipengaruhi oleh besarnya nilai T_2 dan P_2 . Semakin besar

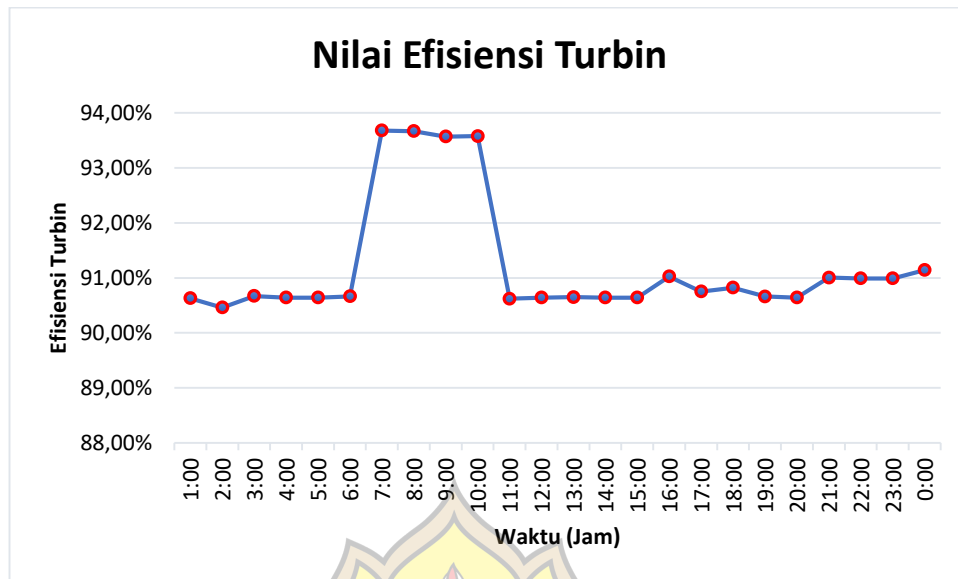
nilai T_2 dan P_2 maka nilai efisiensi kompresor semakin baik. Dapat dilihat pada tabel 4.4 supaya lebih jelas.

Tabel 4.4 Perbandingan Nilai Efisiensi Kompresor Dengan Nilai T_2 dan Nilai P_2

Jam	Efisiensi Kompresor	T_2 ($^{\circ}\text{C}$)	P_2 (bar)
1:00	82,66%	342,76	9,38
2:00	83,10%	343,94	9,4
3:00	82,84%	342,83	9,42
4:00	82,99%	341,38	9,37
5:00	83,36%	343,46	9,42
6:00	83,40%	343,32	9,42
7:00	80,55%	329,67	8,27
8:00	81,26%	330,72	8,29
9:00	81,97%	334,71	8,62
10:00	82,38%	335,65	8,67
11:00	82,20%	337,14	8,66
12:00	82,37%	337,76	8,66
13:00	82,46%	337,03	8,71
14:00	82,31%	336,06	8,68
15:00	81,92%	337,24	8,67
16:00	82,12%	335,75	8,67
17:00	80,35%	328,01	8,1
18:00	80,04%	326,34	8,11
19:00	82,79%	341,93	9,36
20:00	80,23%	325,85	8,13
21:00	80,08%	323,22	8
22:00	80,23%	323,32	8
23:00	79,98%	323,74	8,01
0:00	79,98%	322	7,96

4.4 Efisiensi Turbin

Berdasarkan hasil perhitungan nilai efisiensi yang tertera pada Tabel 4.1 dapat diketahui nilai efisiensi tertinggi, terendah, dan rata-rata pada turbin unit GTG 2.3 pada tanggal 2 Februari 2020 yang dapat dilihat datanya di dalam grafik pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Grafik Nilai Efisiensi Turbin

Nilai efisiensi tertinggi dari turbin sebesar 93.68% pada pukul 07:00 dan efisiensi terendahnya terdapat pada pukul 02:00 sebesar 90.46%. Nilai rata-rata efisiensi turbin didapat sebesar 91.23%. Nilai efisiensi turbin dipengaruhi oleh besarnya nilai P_3 dan T_4 . Semakin besar nilai P_3 dan T_4 maka nilai efisiensi turbin semakin baik. Dapat dilihat pada tabel 4.5 supaya lebih jelas.

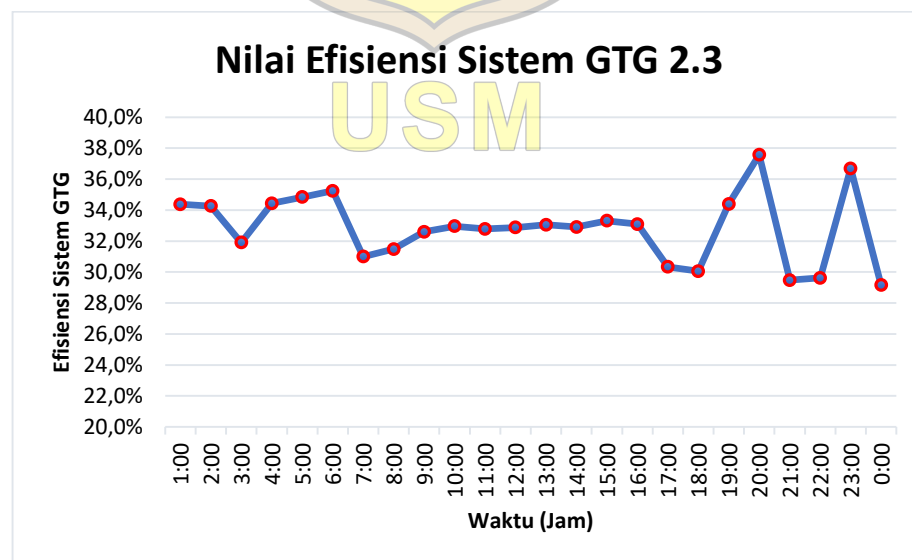
Tabel 4.5 Perbandingan Nilai Efisiensi Turbin Dengan Nilai P_3 dan Nilai T_4

Jam	Efisiensi Turbin	P_3 (bar)	T_4 (°C)
1:00	90,63%	9,38	560,92
2:00	90,46%	9,4	559,95
3:00	90,67%	9,42	558,15
4:00	90,64%	9,37	560,99
5:00	90,64%	9,42	560,06
6:00	90,67%	9,42	558,84
7:00	93,68%	8,27	560,3
8:00	93,67%	8,29	558,84
9:00	93,57%	8,62	561,13
10:00	93,58%	8,67	559,57
11:00	90,62%	8,66	560,33
12:00	90,64%	8,66	559,15

Jam	Efisiensi Turbin	P ₃ (bar)	T ₄ (°C)
13:00	90,65%	8,71	558,7
14:00	90,64%	8,68	558,74
15:00	90,64%	8,67	558,46
16:00	91,03%	8,67	560,02
17:00	90,75%	8,1	549,36
18:00	90,82%	8,11	543,22
19:00	90,66%	9,36	559,53
20:00	90,64%	8,13	543,56
21:00	91,01%	8	524,57
22:00	90,99%	8	525,51
23:00	90,99%	8,01	525,47
0:00	91,14%	7,96	515,47

4.5 Efisiensi Sistem GTG

Berdasarkan hasil perhitungan nilai efisiensi yang tertera pada Tabel 4.1 dapat diketahui nilai efisiensi tertinggi, terendah, dan rata-rata pada sistem unit GTG 2.3 pada tanggal 2 Februari 2020 yang dapat dilihat datanya di dalam grafik pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Grafik Nilai Efisiensi Sistem GTG 2.3

Nilai efisiensi tertinggi dari sistem unit GTG 2.3 yaitu sebesar 37.57% pada pukul 20:00 dan efisiensi terendahnya terdapat pada pukul 24:00 yaitu sebesar 29.15%. Nilai rata-rata efisiensi sistem GTG 2.3 didapat sebesar 32.85%. Berdasarkan buku “*Gas Turbine Engineering Handbook 2nd*” karangan Meherwan P. Boyce dijelaskan mengenai nilai ideal efisiensi pada unit GTG yang memiliki kapasitas antara 3 MW hingga 480 MW yaitu berkisar antara 30%-46%. Dari hasil perhitungan yang telah diperoleh, dapat diketahui bahwa nilai efisiensi pada unit GTG 2.3 dapat dikategorikan normal karena tidak melewati batasan minimum rentangan nilai ideal nilai efisiensi. Nilai efisiensi sistem GTG dipengaruhi oleh besarnya nilai *temperature* gas buang pada T₄ yang terdapat pada kondisi 4. Nilai efisiensi akan maksimal apabila *temperature* dan *pressure* pada kondisi 4 bernilai tinggi, tetapi nilai tersebut memiliki batasan maksimal yang telah ditentukan pada spesifikasi peralatannya yaitu dengan *temperature* sebesar 550.8 °C dan *pressure* sebesar 1.045 bar. Dapat dilihat pada tabel 4.6 supaya lebih jelas.

Tabel 4.6 Perbandingan Nilai Efisiensi Sistem GTG 2.3 Dengan Nilai T₄

Jam	Efisiensi Sistem	T ₄ (°C)
1:00	34,37%	560,92
2:00	34,26%	559,95
3:00	31,90%	558,15
4:00	34,44%	560,99
5:00	34,84%	560,06
6:00	35,24%	558,84
7:00	30,99%	560,3
8:00	31,48%	558,84
9:00	32,60%	561,13
10:00	32,96%	559,57
11:00	32,78%	560,33

12:00	32,87%	559,15
13:00	33,05%	558,7
14:00	32,91%	558,74
15:00	33,31%	558,46
16:00	33,09%	560,02
17:00	30,33%	549,36
18:00	30,05%	543,22
19:00	34,39%	559,53
20:00	37,57%	543,56
21:00	29,48%	524,57
22:00	29,62%	525,51
23:00	36,69%	525,47
0:00	29,15%	515,47

4.6 Analisis Hasil Nilai Efisiensi

Dari hasil penelitian yang sudah dibahas, dapat diketahui nilai parameter data operasi tertinggi dari unit GTG 2.3 diperoleh daya yang dihasilkan (P) yaitu sebesar 95.11 MW, T_1 sebesar 31.39 °C, T_2 sebesar 343.94 °C, P_2 sebesar 9.42 bar, T_4 sebesar 561.13 °C, \dot{m}_{BB} sebesar 5.93 kg/s. Sedangkan data operasi terendah dari unit GTG 2.3 diperoleh daya yang dihasilkan (P) sebesar 67.77 MW, T_1 sebesar 26.95 °C, T_2 sebesar 322 °C, P_2 sebesar 7.96 bar, T_4 sebesar 515.47 °C, \dot{m}_{BB} sebesar 4.65 kg/s. Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 4.3 didapatkan hasil nilai efisiensi tertinggi pada kompresor, turbin, dan sistem pada unit GTG 2.3 secara berturut-turut sebesar 83.40%, 93.68%, dan 37.57%. Nilai efisiensi terendah secara berturut-turut sebesar 79.98%, 90.46%, dan 29.15%. Sedangkan nilai efisiensi rata-rata secara berturut-turut sebesar 81.73%, 91.23%, dan 32.85%.

Laju aliran bahan bakar dan nilai kalor mempengaruhi nilai efisiensi pada sistem karena saat terjadi proses pembakaran, bahan bakar yang digunakan dan

udara yang masuk harus seimbang. Keseimbangan penggunaan antara bahan bakar dan udara yang masuk akan berpengaruh terhadap daya yang dihasilkan.

Besarnya nilai efisiensi pada sistem dipengaruhi oleh nilai *temperature* gas buang pada kondisi 4. Semakin tinggi *temperature* dan *pressure*-nya maka efisiensi yang dihasilkan akan semakin tinggi, tetapi tingginya nilai *temperature* dan *pressure* pada gas buang memiliki nilai maksimal yaitu sebesar 550.8 °C dan 1.045 bar. Batasan maksimal tersebut didapat berdasarkan spesifikasi peralatan. Selain itu, nilai efisiensi sistem dapat meningkat seiring bertambahnya daya yang dihasilkan serta besarnya energi pada bahan bakar yang digunakan.

Pengaruh nilai efisiensi berpengaruh pada daya yang dihasilkan pada generator tidak maksimal. Hal ini disebabkan karena terdapat rugi-rugi pada unit GTG berupa *temperature* pada komponen yang berlebih yang menyebabkan panas yang merambat dari komponen satu ke komponen yang lainnya, serta kebocoran gas yang terdapat pada ruang bakar.

Berdasarkan buku “*Gas Turbine Engineering Handbook 2nd*” karangan Meherwan P. Boyce idealnya nilai efisiensi sistem pada GTG berkisar antara 30%-46% dengan kapasitas beban yang dihasilkan sebesar 3 MW hingga 480 MW. Dari hasil perhitungan yang telah diperoleh, dapat diketahui bahwa nilai efisiensi pada unit GTG 2.3 dapat dikategorikan normal karena tidak melewati batasan minimum rentangan nilai ideal nilai efisiensi. Nilai efisiensi sistem GTG 2.3 yang dihasilkan berpengaruh pada daya yang dihasilkan pada generator, semakin besar daya yang dihasilkan pada generator maka nilai efisiensi unit GTG 2.3 akan cenderung meningkat.

Gas buang yang dihasilkan dari turbin unit GTG 2.3 memiliki energi yang sangat tinggi. Hal ini dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin pada unit *Steam Turbine Generator* (STG) yang selanjutnya digunakan untuk produksi listrik.

Nilai efisiensi pada unit GTG 2.3 dapat ditingkatkan dengan cara memasang *intercooler* pada kompresor agar udara masuk memiliki *temperature* lebih rendah sehingga dapat menghasilkan daya *output* yang lebih maksimal. Penambahan sudu serang pada *inlet guide vane* dapat membantu mengoptimalkan proses pembakaran yang berguna untuk mengatur laju aliran udara yang masuk. Selain itu, pemeliharaan rutin secara berkala pada komponen sangat diperlukan guna menjaga performansi setiap komponennya.



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah melakukan penelitian mengenai efisiensi sistem pada unit GTG 2.3 pada tanggal 2 Februari 2020, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Nilai efisiensi tertinggi pada kompresor, turbin, dan sistem pada unit GTG 2.3 secara berturut-turut sebesar 83.40%, 93.68%, dan 37.57%. Nilai efisiensi terendah secara berturut-turut sebesar 79.98%, 90.46%, dan 29.15%. Sedangkan nilai efisiensi rata-rata secara berturut-turut sebesar 81.73%, 91.23%, dan 32.85%.
2. Fluktuasi nilai beban, *temperature*, dan *pressure* mempengaruhi nilai efisiensi pada sistem GTG.
3. Semakin tinggi nilai efisiensi yang dihasilkan unit GTG, maka dibutuhkan kinerja unit yang tinggi, hal ini berpengaruh pada nilai *temperature*, *pressure*, dan entalpi yang meningkat.
4. Pengaruh nilai efisiensi berpengaruh pada daya yang dihasilkan pada generator tidak maksimal.
5. Semakin besar daya yang dihasilkan pada generator, maka nilai efisiensi unit GTG 2.3 cenderung meningkat.

5.2 Saran

Saran yang dianjurkan setelah melakukan penelitian mengenai efisiensi sistem unit GTG 2.3 dengan melihat hasil perhitungan yang telah dilakukan guna meningkatkan efisiensi agar unit pada GTG 2.3 dapat bekerja lebih optimal antara lain sebagai berikut :

1. Membuat *intercooler* pada kompresor agar *temperature* udara masuk lebih rendah sehingga efisiensi yang dihasilkan akan lebih maksimal.
2. Melakukan pemeliharaan rutin secara berkala pada komponen maupun sistemnya seperti sistem pendingin dan pelumasan.
3. Menambahkan sudu serang pada *inlet guide vane* yang berfungsi mengatur laju aliran udara sesuai kebutuhan.
4. Lebih memaksimalkan penggunaan gas buang pada GTG agar dapat dimanfaatkan untuk proses pemanasan pada unit STG.
5. Penelitian pada analisis efisiensi operasional sistem GTG 2.3 pada PLTGU hanya mengacu pada siklus terbuka saja, maka dari itu untuk penelitian berikutnya diperlukan analisis perhitungan mengenai siklus kombinasi guna mengetahui sistem kerja pembangkit pada PLTGU PT. Indonesia Power Semarang *Power Generation Unit* yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- A.Cengel, Y. and A.Boles, M. (2006) 'Thermodinamics An Engineering Approach', p. 910.
- General Electric (2015) *Combined Cycle Power Plant*. Schenectady, New York, Amerika: GE Proprietary Information.
- Gusnita, N. and Said, K. S. (2017) 'Analisa Efisiensi dan Pemanfaatan Gas Buang Turbin Gas Alsthom Pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas Kapasitas 20 Mw', *Jurnal Sains, Teknologi dan Industri*, 14(2), pp. 209–218.
- Kurniawan, R. and MulfiHazwi (2014) 'Analisa Performansi Pembangkit Listrik Tenaga Gas', *Jurnal e-Dinamis*, 10(2), pp. 101–107.
- Miswandi and Martin, A. (2015) 'Analisis Eksergi Pada Ruang Bakar Pada Pltg Teluk Lembu 20 Mw', *Jom FTEKNIK*, 2(2), p. 1.
- Muchlis, M. and Permana, A. D. (2013) 'Proyeksi Kebutuhan Listrik PLN 2003 s.d. 2020', *Pengembangan Sistem Kelistrikan dan Menunjang Pembangunan Nasional Jangka Panjang*, p. 11 Halaman. Available at: http://www.oocities.org/markal_bppt/publish/slistrk/slmuch.pdf.
- Onny (2016) *Prinsip Kerja Siklus Brayton*, www.artikel-teknologi.com. Available at: <https://artikel-teknologi.com/siklus-brayton/>.
- P. Boyce, M. (2001) *Gas Turbine Engineering Handbook - Boyce, M P - 2Ed*

(2001). United Kingdom.

Prastiko, A. (2015) 'Analisis Keandalan Pada Turbin Gas Di Pt . Petrokimia Gresik-Jawa Timur', (1), pp. 5–8.

Trisnanto, M. (2017) 'Analisa Kinerja Generator Turbin Gas Terhadap Perubahan Beban Pada Pt Indonesia Power Unit Pembangkit Semarang', pp. 2, 70.



LAMPIRAN

Lampiran 1. Daftar Notasi

Wca = kerja aktual turbin

Wta = kerja aktual kompresor

h = entalpi

T = temperature

P = pressure

Pr = angka prandtl

k = konstanta rasio panas spesifik

Qin = kalor masuk

m_{BB} = laju aliran bahan bakar

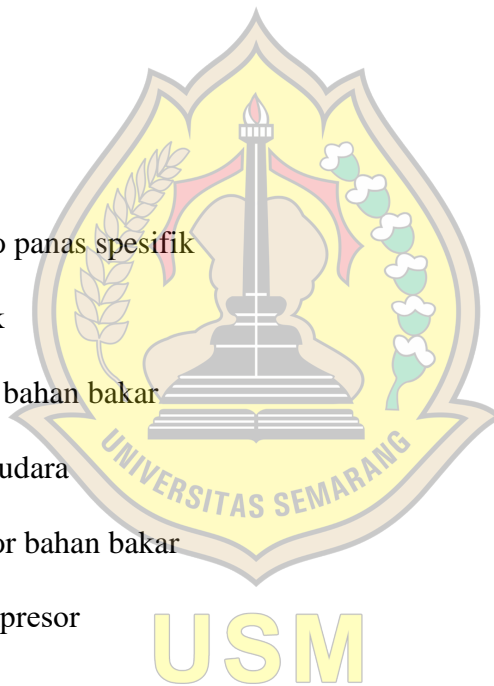
\dot{m}_{ud} = laju aliran udara

$NKBB$ = nilai kalor bahan bakar

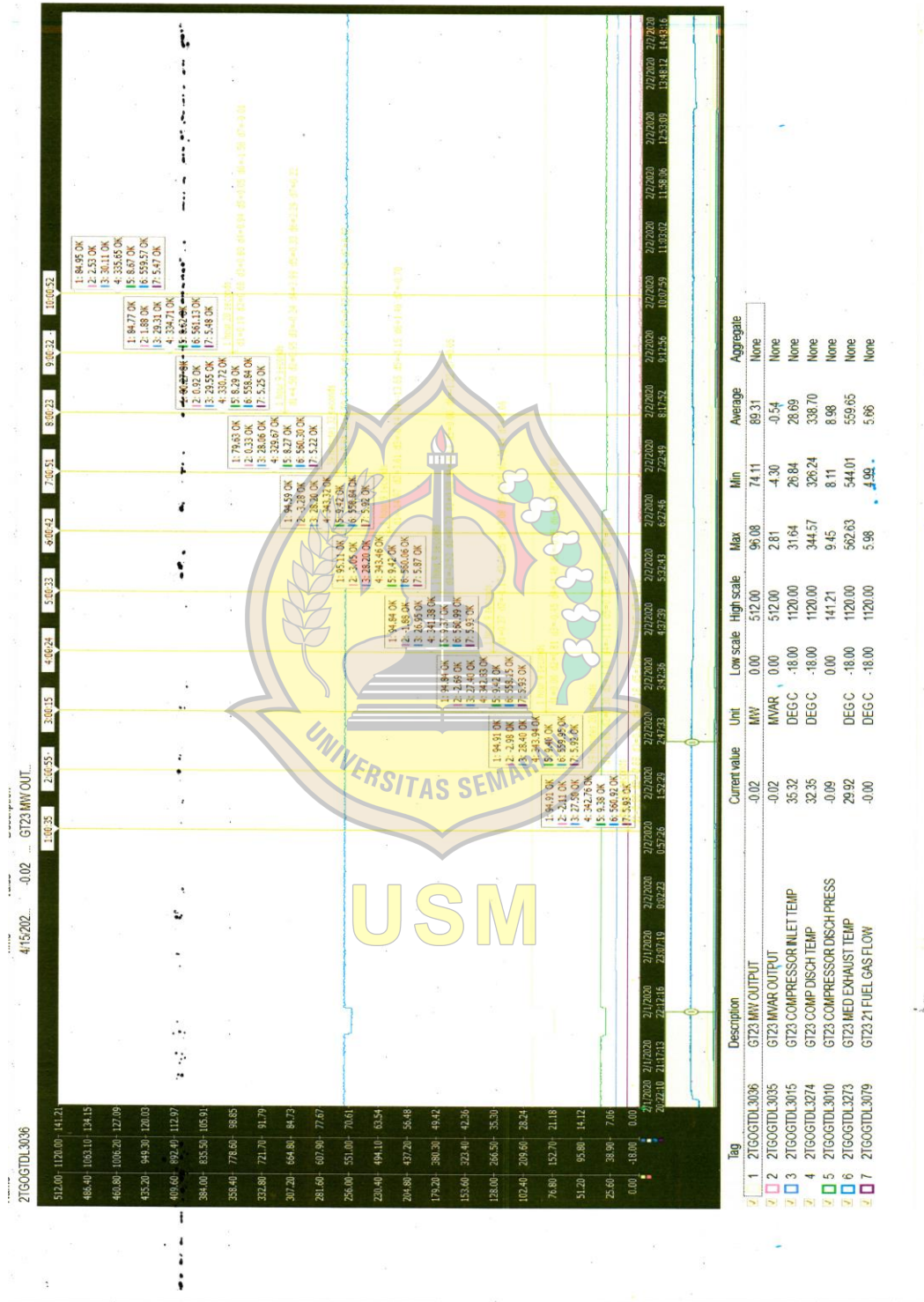
η_c = efisiensi kompresor

η_t = efisiensi turbin

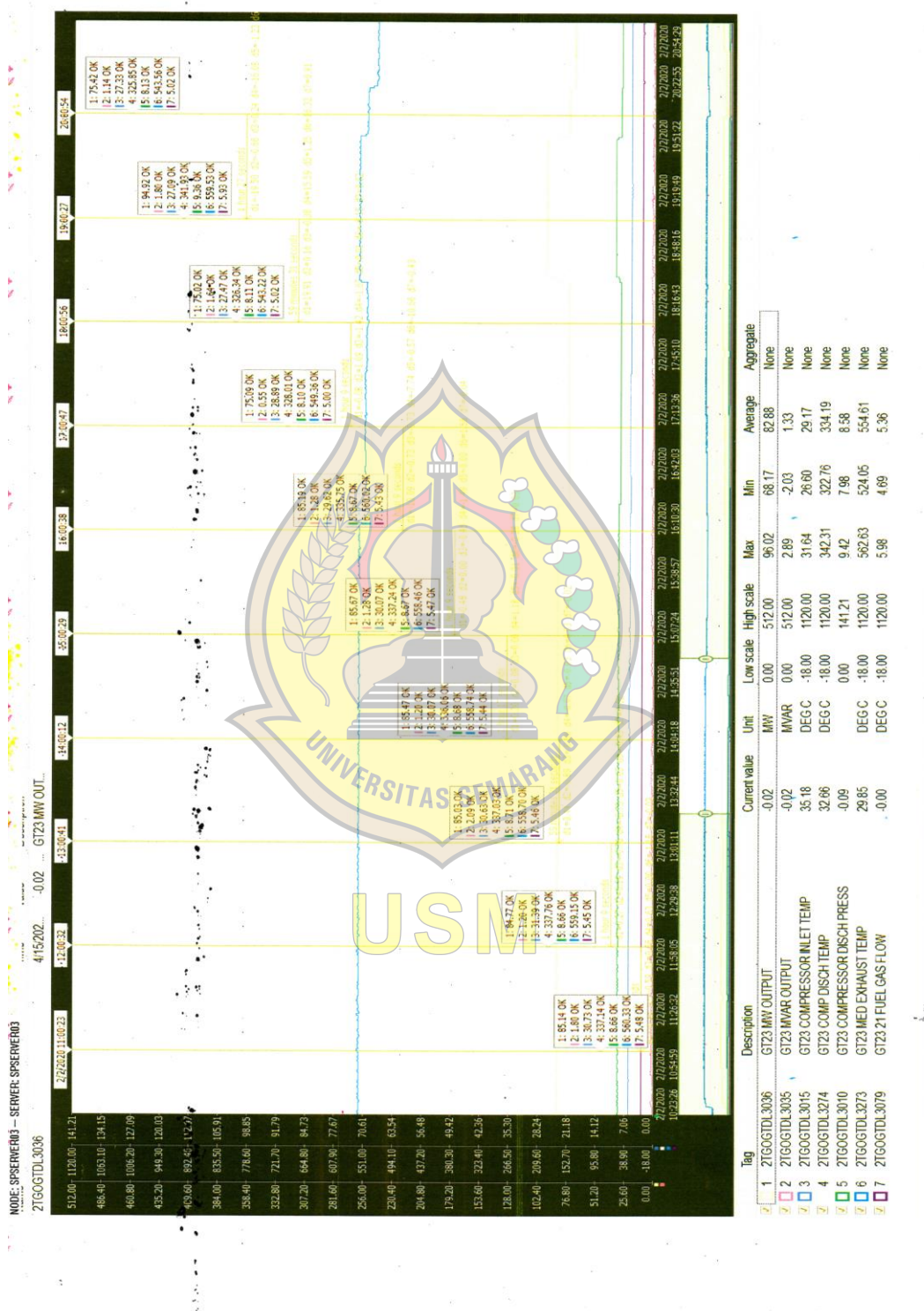
η_{th} = efisiensi thermal sistem GTG



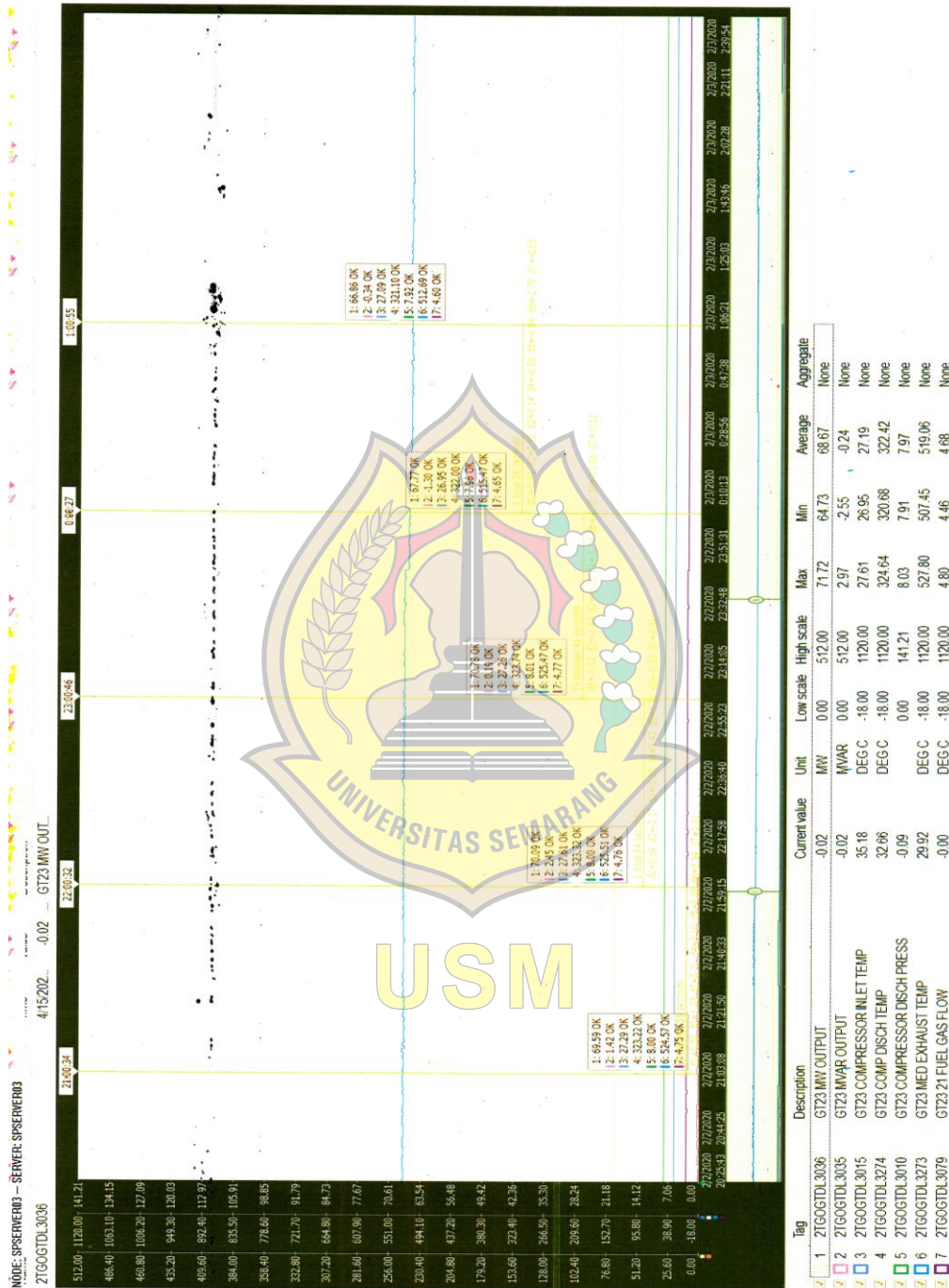
Lampiran 2. Data Operasi Unit GTG 2.3 Tanggal 2 Februari 2020 (1)



Lampiran 3. Data Operasi Unit GTG 2.3 Tanggal 2 Februari 2020 (2)



Lampiran 4. Data Operasi Unit GTG 2.3 Tanggal 2 Februari 2020 (3)



Lampiran 5. Data *Dialy Report* Bahan Bakar Tanggal 2 Februari 2020

PT. Sumber Petrindo Perkasa
Tambak Lorok - Central Java

Daily Report
Date : 03/02/20

Computer ID : FCA
Time : 00:00:00

Meter ID	FT301	FT302	STATION
Product ID	GC	GC	

FISCAL:

Daily Gross	MCF	2199.9	.0	2199.9
Daily Net	MSCF	50588.0	.0	50588.0
Daily Mass	KLB	2364.6	.0	2364.6
Daily Energy	MMBTU	55287.8	.0	55287.8
Cum. Gross	MCF	1990095.8	1126703.3	3116799.1
Cum. Net	MSCF	50126808.0	27622712.6	77749520.6
Cum. Mass	KLB	2335329.3	1280806.7	3616136.0
Cum. Energy	MMBTU	5462313.0	29994518.3	84617831.3

PROPERTIES :

Temperature	Deg.F	82.00	.00
Pressure	PSIG	322.67	.00
Line Density	Lb/Ft3	1.0772	.0000
Base Density	Lb/Ft3	.046741	.000000
Specific Gravity		.61075425	.61075425
K Factor		29000.00	29000.00
Heating Value	Btu/scf	1092.905	.000
Hydrogen Sulfida	ppm	.013	.013
Water Content	lbs/mmscf	3.445	3.445

GAS COMPOSITION :

Mol% Methane	93.5063
Mol% Nitrogen	.4935
Mol% Carbon Dioxide	.0004
Mol% Ethane	3.4589
Mol% Propane	1.2205
Mol% i-Butane	.2545
Mol% n-Butane	.1313
Mol% i-Pentane	.1164
Mol% n-Pentane	.4841
Mol% Water	.0073
Mol% Hydrogen Sulfida	.0000

UNIVERSITAS SEMARANG

USM

Hari H

Lampiran 6. Spesifikasi Unit GTG 2.3

SPECIFICATION M-101 GAS TURBINE UNIT 2.3 AND AUXILIARIES

OPERATING AND CONSTRUCTION DATA

1. GENERAL			
1.1	Model	:	GE / MS 900 1E
1.2	Number of Unit	:	3 per Block
2. NOISE REQUIREMENTS			
2.1	Max. sound level pressure (at 1 m from gas turbine enclosure)	:	95 dBA
2.2	Estimated sound level at 100 m	:	76 dBA
3. Performance Data For Gas Turbine Generators (each) at Rated Site Conditions			
		Base load	75 % 50 %
3.1	Generator power output.....(kw)	109710	82290 54840
3.2	Air flow.....(kg/s)	383	315 316
3.3	Fuel Flow.....(kg/s)	8.14	6.1 4.6
3.4	Heat rate.....(kJ/kWh)	11107	- -
3.5	Exhaust gas flow.....(kg/s)	391	321.5 320.8
3.6	Exhaust gas temperature.....(°C)	550.8	552.7 447.3
3.7	Exhaust pressure.....(mbar gauge)	1.045	1.045 1.045
3.8	NO _x Emmision.....(ppm)	171	- -
4. GAS TURBINE			
4.1 Rotor			
	Manufacturer.....	GENERAL ELECTRIC	
	Number of Shaft.....	1 (one) / Single shaft	
	Number of bearing.....	3 (three)	
	Type.....	Axial rotor	
	Turbine Shaft Speed.....rev/min	3600	
4.2 Air Compressor			
	Type.....	Axial-flow	
	Number of stages.....	17 (seventeen)	
4.3 Turbine			
	Type.....	Axial-flow	
	Number of stages.....	3 (three)	
4.4 Combustion Components			
4.4.1 Combustion chambers			
	System.....	Reverse-flow type	
	Number of combustors.....	14 (fourteen)	
	Number of cross fire tubes.....	14 (fourteen)	
4.4.2 Transition pieces			
	Number of transition pieces.....	14 (fourteen)	

M-101-1

Lampiran 7. Barometer



USM

Lampiran 8. Tabel Gas Ideal (1)

Ideal-gas properties of air											
T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s kJ/kg K	T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s kJ/kg K
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105	600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40902
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.44356
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917	630	638.63	19.84	457.78	92.84	2.46048
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	640	649.22	20.64	465.50	88.99	2.47716
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	650	659.84	21.86	473.25	85.34	2.49364
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	660	670.47	23.13	481.01	81.89	2.50985
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	670	681.14	24.46	488.81	78.61	2.52589
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	680	691.82	25.85	496.62	75.50	2.54175
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	690	702.52	27.29	504.45	72.56	2.55731
298	298.18	1.3543	212.64	631.9	1.69528	700	713.27	28.80	512.33	69.76	2.57277
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	720	734.82	32.02	528.14	64.53	2.60319
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	730	745.62	33.72	536.07	62.13	2.61803
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106	740	756.44	35.50	544.02	59.82	2.63280
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690	750	767.29	37.35	551.99	57.63	2.64737
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249	760	778.18	39.27	560.01	55.54	2.66176
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783	780	800.03	43.35	576.12	51.64	2.69013
340	340.42	2.149	242.82	454.1	1.82790	800	821.95	47.75	592.30	48.08	2.71787
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708	820	843.98	52.59	608.59	44.84	2.74504
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543	840	866.08	57.60	624.95	41.85	2.77170
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313	860	888.27	63.09	641.40	39.12	2.79783
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001	880	910.56	68.98	657.95	36.61	2.82344
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96633	900	932.93	75.29	674.58	34.31	2.84856
400	400.98	3.806	286.16	301.6	1.99194	920	955.38	82.05	691.28	32.18	2.87324
410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01699	940	977.92	89.28	708.08	30.22	2.89748
420	421.26	4.522	300.69	266.6	2.04142	960	1000.55	97.00	725.02	28.40	2.92128
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533	980	1023.25	105.2	741.98	26.73	2.94468
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870	1000	1046.04	114.0	758.94	25.17	2.96770
450	451.80	5.775	322.62	223.6	2.11161	1020	1068.89	123.4	776.10	23.72	2.99034
460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407	1040	1091.85	133.3	793.36	23.29	3.01260
470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604	1060	1114.86	143.9	810.62	21.14	3.03449
480	482.49	7.268	344.70	189.5	2.17760	1080	1137.89	155.2	827.88	19.98	3.05608
490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876	1100	1161.07	167.1	845.33	18.896	3.07732
500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952	1120	1184.28	179.7	862.79	17.886	3.09825
510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993	1140	1207.57	193.1	880.35	16.946	3.11883
520	523.63	9.684	374.36	154.1	2.25997	1160	1230.92	207.2	897.91	16.064	3.13916
530	533.98	10.37	381.84	146.7	2.27967	1180	1254.34	222.2	915.57	15.241	3.15916
540	544.35	11.10	389.34	139.7	2.29906	1200	1277.79	238.0	933.33	14.470	3.17888
550	555.74	11.86	396.86	133.1	2.31809	1220	1301.31	254.7	951.09	13.747	3.19834
560	565.17	12.66	404.42	127.0	2.33685	1240	1324.93	272.3	968.95	13.069	3.21751
570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531						

Lampiran 9. Tabel Gas Ideal (2)

T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s kJ/kg K	T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s kJ/kg K
1260	1348.55	290.8	986.90	12.435	3.23638	1600	1757.57	791.2	1298.30	5.804	3.52364
1280	1372.24	310.4	1004.76	11.835	3.25510	1620	1782.00	834.1	1316.96	5.574	3.53879
1300	1395.97	330.9	1022.82	11.275	3.27345	1640	1806.46	878.9	1335.72	5.355	3.55381
1320	1419.76	352.5	1040.88	10.747	3.29160	1660	1830.96	925.6	1354.48	5.147	3.56867
1340	1443.60	375.3	1058.94	10.247	3.30959	1680	1855.50	974.2	1373.24	4.949	3.58335
1360	1467.49	399.1	1077.10	9.780	3.32724	1700	1880.1	1025	1392.7	4.761	3.5979
1380	1491.44	424.2	1095.26	9.337	3.34474	1750	1941.6	1161	1439.8	4.328	3.6336
1400	1515.42	450.5	1113.52	8.919	3.36200	1800	2003.3	1310	1487.2	3.994	3.6684
1420	1539.44	478.0	1131.77	8.526	3.37901	1850	2065.3	1475	1534.9	3.601	3.7023
1440	1563.51	506.9	1150.13	8.153	3.39586	1900	2127.4	1655	1582.6	3.295	3.7354
1460	1587.63	537.1	1168.49	7.801	3.41247	1950	2189.7	1852	1630.6	3.022	3.7677
1480	1611.79	568.8	1186.95	7.468	3.42892	2000	2252.1	2068	1678.7	2.776	3.7994
1500	1635.97	601.9	1205.41	7.152	3.44516	2050	2314.6	2303	1726.8	2.555	3.8303
1520	1660.23	636.5	1223.87	6.854	3.46120	2100	2377.7	2559	1775.3	2.356	3.8605
1540	1684.51	672.8	1242.43	6.569	3.47712	2150	2440.3	2837	1823.8	2.175	3.8901
1560	1708.82	710.5	1260.99	6.301	3.49276	2200	2503.2	3138	1872.4	2.012	3.9191
1580	1733.17	750.0	1279.65	6.046	3.50829	2250	2566.4	3464	1921.3	1.864	3.9474

Note: The properties P_r (relative pressure) and v_r (relative specific volume) are dimensionless quantities used in the analysis of isentropic processes, and should not be confused with the properties pressure and specific volume.

Source: Kenneth Wark, *Thermodynamics*, 4th ed. (New York: McGraw-Hill, 1983), pp. 78586, table A5. Originally published in J. H. Keenan and J. Kaye, *Gas Tables* (New York: John Wiley & Sons, 1948).



PROGRAM STUDI S1 TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK - UNIVERSITAS SEMARANG

KARTU KONSULTASI TA



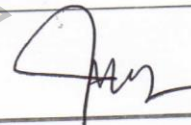
NAMA : INDRA YOGASWARA

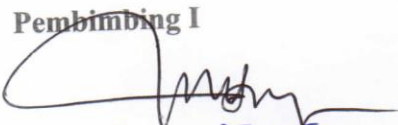
NIM : 0.441.18.0032

JUDUL TA :
Analisis Efisiensi Operasional Sistem PLTB
Unit GTG 23 PT. Indonesia Power Semarang PDV

PEMBIMBING I : Dr. Supari, ST, MT

NO	TGL	MATERI	TANDA TANGAN PEMBIMBING
1	29/4/20	Ace proposal TA	f
		Bilangit Bob I 1/2 III	f
	8/6/20	Laporan studi	f
		daftar isi buku pengantar, dan	
		formulir "daftar pustaka"	
		Bob I 2/3/20	
		Tujuan TA disebarkan	
		29/1/20 Bob IV dan	f
		kesimpulan	
		Bob II - Penunjang pustaka	
		menyusun buku pedoman TA	f

NO	TGL	MATERI	TANDA TANGAN PEMBIMBING
		Semua gambar & tabel harus ada (ditunjuk/ditunjuk dalam paragraf/otline) → Bab II, Bab III	
		Bab III & Bab IV & paragraf Bab V ketampakan harus sesuai di Bab IV & sesuai tugas di Bab I.	
	17/6	Ace Semangit	

Pembimbing I

 (Dr. Supari, ST, MT)
 NIS. 06557003102033



PROGRAM STUDI S1 TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK - UNIVERSITAS SEMARANG

KARTU KONSULTASI TA

NAMA : INDRA YOGA SWARA

NIM : C.441.18.003.2

JUDUL TA :

..... Analisis Efisiensi Operasional Sistem PLTSU Unit DTD 2.3

..... PT. Indonesia Power Semarang PDU

PEMBIMBING II : USM
Harmini ST. M. Eng

NO	TGL	MATERI	LEMBAGA TANGAN PEMBIMBING
1	24/3-20	Revisi Proposal : - Absorpsi (lanjutan) later-bilakings, rekonstruksi, dan lain-lain - Revisi pada awal (Bismillah, pengantar, efisiensi) - Bab III dibuat buku diagram (peta alir/flowchart)	[Signature]
2	6/4-20	Revisi Proposal Lanjutan : - Masukkan standard efisiensi dan metodologi - Perbaiki flowchart - Kajian pustaka dibuat arkhais (literasi)	[Signature]
3	12/4-20	Revisi Proposal Lanjutan : - Absorpsi dan lain-lain (SPN) - Peta alir dibuat dan urut abjad	[Signature]
4	14/4-20	AEC proposal TA	[Signature]
5	26/4-20	Revisi Laporan TA : - Kata Sambung tidak boleh ardepan kalimat - Hindari kata perula - Perhatikan rumus pada Bab II dengan urut alfabet	[Signature]
6	6/5-20	AEC Bab I-III (Laporan TA)	[Signature]
7	27/5-20	Revisi Laporan TA lanjutan : - perlu dituliskan spesifikasi turbin pada Bab 2.3 - Tambahkan Bab 2.4 rumus yang ada pada Bab II di Bab II - Tambahkan bab baru sebelum Bab 2 atau setelah 2.5	[Signature]
8	31/5-20	Revisi Laporan TA lanjutan : - Revisi hasil perhitungan dan di-24.00 pada tabel - kesimpulan disesuaikan dengan tujuan pada Bab I	[Signature]
9	04/5-20	Revisi Laporan TA : - Selesaikan Tabel dan Tambahkan data di Bab I - Daftar Notasi disempurnakan pada lampiran	[Signature]
10	2/6-20	AEC laporan TA Bab I- Bab II	[Signature]

NO	TGL	MATERI	TA TAN PEMBIMBING
		asistensikan ke p ¹ . supari	
	4 juni 2020	[Signature]	

Pembimbing II
 [Signature]
 (...Machmud, S.T., M. Eng.)
 NIS. 06557003102136

LEMBAR REVISI TUGAS AKHIR
Teknik Elektro Fakultas
Teknik Universitas Semarang

Nama Mahasiswa : **Indra Yogaswara**
NIM : C.441.18.0032
Dosen Pembimbing : **Harmini,ST.,M.Eng**

Diserahkan Paling Lambat :

Hal Yang Perlu Direvisi

1. tambahkan blok diagram
2. kesimpulan no 3 bisa dipertika.



Semarang,

Rabu 15 Juli 2020

Menyetujui/mengesahkan

(Harmini,ST.,M.Eng)

USM



**YAYASAN ALUMNI UNIVERSITAS DIPONEGORO
UNIVERSITAS SEMARANG**
Sekretariat : Jl. Soekarno Hatta Tlogosari Semarang 50196 Telp.(024)6702757 Fax.(024)6702272

**SURAT KETERANGAN
HASIL UJIAN TA
PROGRAM STUDI S1 S1 TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO FAKULTAS TEKNIK**

Yang bertanda tangan dibawah ini Ketua Program Studi S1 Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Semarang, menerangkan bahwa mahasiswa :

Nama Mahasiswa : INDRA YOGASWARA
N I M : C.441.18.0032
Telah melaksanakan ujian TA pada:
Hari/Tanggal : Senin, 27 Juli 2020
Pukul : 10.00 WIB
Tempat : Fakultas Teknik Universitas Semarang

Dan Dinyatakan LULUS / TIDAK LULUS dengan REVISI / TIDAK REVISI *)

No.	Nama Penguji	Keterangan *)	Menyetujui Sudah Di Revisi
1.	Dr. Supari, ST, MT	Revisi / Tidak Revisi	
2.	Harmini, ST, M.Eng	Revisi / Tidak Revisi	
3.	Titik Nurhayati, ST, M.Eng	Revisi / Tidak Revisi	

Demikian surat keterangan ini dibuat agar dapat digunakan sebagaimana mestinya.

Semarang, 27 Juli 2020

USM

An.Dekan
Ka. Progdi S1 Teknik Elektro

Titik Nurhayati, S.T., M.Eng.
NIS. 06557003102025

*) Coret yang tidak perlu

BIODATA PENULIS

Nama : Indra Yogaswara
NIM : C.441.18.0032
Tempat / Tanggal Lahir : Bandung / 22 Februari 1996
Alamat : Jl. Arjuna, No.15, Pendirikan Kidul, Kec.
Semarang Tengah, Kota Semarang, Jawa Tengah
50131
Riwayat Pendidikan : SD Kartika Siliwangi 4, Tahun 2002 - 2008
SMP Negeri 2 Bandung, Tahun 2008 - 2011
SMA Negeri 9 Bandung, Tahun 2011 - 2014
Politeknik Negeri Bandung, Tahun 2014 - 2017
Universitas Semarang, Tahun 2018 - 2020

**USM**